

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Jakov Stošić

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Lovorka Grgec Bermanec, dipl. ing.

Student:

Jakov Stošić

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorici prof. dr. sc. Lovorki Grgec Bermanec, dipl. ing. koja je svojim znanstvenim i stručnim savjetima pomogla u izradi ovog završnog rada. Zahvaljujem se poduzeću Vage d.o.o. koje je ustupilo svoj umjerni laboratorij za masu za provođenje mjerenja za moj završni rad. Također zahvalu upućujem i gospodinu Janku Peraniću, dipl. ing. , zaposleniku i voditelju umjernog laboratorija za masu poduzeća Vage d.o.o. , koji mi je pomogao prilikom izvođenja i obrade podataka mjerenja potrebnih u mojem završnom radu.

Jakov Stošić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Jakov Stošić**

Mat. br.: 0035185856

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Umjeravanje masa nestandardnih tijela**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Calibration of non-standard mass**

Opis zadatka:

Po svom obliku utezi za tlačne vage ne odgovaraju mjeriteljskim zahtjevima normiranih utega. Za potrebe preciznog određivanja efektivnog tlaka etalonske tlačne vage potrebno je poznavati pravu i konvencionalnu masu takvih "specijalnih" utega. U radu je potrebno opisati i provesti umjeravanje dva seta nestandardnih utega te izraditi ispitne protokole s prijedlogom pripadajućih mjernih listova. Posebnu pažnju posvetiti procjeni mjerne nesigurnosti umjeravanja. U radu koristiti postojeću mjernu opremu Laboratorija za procesna mjerenja i umjernog laboratorija za masu Vage te razmotriti mogućnosti poboljšanja

Potrebno je izraditi:

- Pregled teorijskih podloga za umjeravanje utega
- Projektiranje mjerne linije za umjeravanje nenormiranih utega do 10 kg
- Opis postupka umjeravanja i potrebnih korekcija
- Postupak procjene mjerne nesigurnosti umjeravanja
- Primjere rezultata umjeravanja

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

25. studenog 2014.

Zadatak zdao:

Izv. prof. dr. sc. Lovorka Grgec Bermanec

Rok predaje rada:

1. rok: 26. veljače 2015.

2. rok: 17. rujna 2015.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 2., 3., i 4. ožujka 2015.

2. rok: 21., 22., i 23. rujna 2015.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. TEORIJSKI PREGLED MJERENJA MASE I UMJERAVANJA UTEGA	2
3. TEHNIČKI PROPISI ZA STANDARDIZIRANE UTEGE	5
3.1. Područje primjene utega.....	5
3.2. Najveće dopuštene pogreške pri ovjeravanju utega.....	6
3.2.1. Najveće dopuštene pogreške pri prvom ovjeravanju	7
3.2.2. Najveće dopuštene pogreške pri naknadnom ovjeravanju.....	10
3.3. Oblik utega.....	10
3.3.1. Utezi od 1 gram ili manji	10
3.3.2. Utezi od 1 gram do 50 kilograma	10
3.3.3. Utezi od 50 kilograma ili veći.....	11
3.4. Materijal utega	11
3.4.1. Utezi razreda E.....	11
3.4.2. Utezi razreda F.....	11
3.4.3. Utezi razreda M od 50 kilograma ili manji	11
3.4.4. Utezi razreda M veći od 50 kilograma.....	12
3.5. Magnetizam utega	12
3.5.1. Trajna magnetizacija utega	12
3.5.2. Magnetska susceptibilnost utega.....	13
3.6. Gustoća materijala utega	13
3.7. Stanje površine utega	14
4. RADNA UPUTA ZA UMJERAVANJE NESTANDARDNIH UTEGA.....	15
4.1. Potrebno osoblje i oprema.....	15
4.1.1. Potrebno osoblje.....	15
4.1.2. Potrebna oprema	15
4.2. Pripremne radnje	18
4.2.1. Čišćenje utega	18
4.2.2. Aklimatizacija utega	19
4.2.3. Pregled vage.....	20
4.2.4. Zagrijavanje vage.....	20
4.2.5. Predopterećenje i provjera točnosti vage	20
4.2.6. Ispitivanje ponovljivosti vage	20
4.3. Uvjeti okoliša	21
4.4. Postupak umjeravanja utega metodom ABBA	22
4.5. Određivanje mjerne nesigurnosti	24

4.6. Označavanje utega	24
5. PROCJENA MJERNE NESIGURNOSTI UMJERAVANJA NESTANDARDNOG UTEGA.....	25
5.1. Masa, gustoća i volumen ispitnog nestandardnog utega.....	26
5.2. Procjena mjerne nesigurnosti	28
5.2.1. Procjena mjerne nesigurnosti tipa A	28
5.2.2. Procjena mjerne nesigurnosti tipa B	29
5.2.2.1. Mjerna nesigurnost podjeljka vage	29
5.2.2.2. Mjerna nesigurnost etalona	29
5.2.2.3. Mjerna nesigurnost drifta etalona	30
5.2.2.4. Mjerna nesigurnost zbog utjecaja uzgona.....	30
5.2.2.5. Mjerna nesigurnost zbog ekscentričnosti vage	31
5.2.3. Kombinirana mjerna nesigurnost postupka umjeravanja.....	32
5.2.4. Proširena mjerna nesigurnost postupka umjeravanja.....	32
5.2.5. Prikazivanje rezultata umjeravanja	33
6. PRIKAZ PRORAČUNA I REZULTATA UMJERAVANJA DVIJU GARNITURA NESTANDARDNIH UTEGA TLAČNIH VAGA	34
6.1. Proračun mjerne nesigurnosti na jednom utegu	35
6.2. Rezultati umjeravanja dviju garnitura nestandardnih utega.....	38
7. ZAKLJUČAK.....	41
LITERATURA.....	42

POPIS SLIKA

Slika 1. Prikaz sljedivosti	3
Slika 2. Vaganje u zraku	8
Slika 3. Vaganje u vakuumu	9
Slika 4. Vaga HP 220 DC.....	16
Slika 5. Vaga PR 5003	16
Slika 6. Vaga APP 25	17
Slika 7. Etaloni F1 klase.....	18
Slika 8. Ispitivanje ekscentričnosti vage	32
Slika 9. Garnitura utega br. 1	34
Slika 10. Garnitura utega br. 2	34
Slika 11. Prikaz rezultata dobivenih ABBA metodom	35

POPIS TABLICA

Tablica 1. Najveće dopuštene pogreške za utege ($\pm \delta m$ u mg)	7
Tablica 2. Oblici utega od 1 g ili manjih	10
Tablica 3. Maksimalna polarizacija, $\mu o M$	12
Tablica 4. Maksimalna susceptibilnost (χ)	13
Tablica 5. Najmanje i najveće granice gustoće materijala utega (ρ_{\min}, ρ_{\max})	13
Tablica 6. Najveće vrijednosti hrapavosti površine	14
Tablica 7. Vrijeme stabilizacije nakon čišćenja utega	18
Tablica 8. Vrijeme aklimatizacije ili temperaturna stabilizacija utega u satima	19
Tablica 9. Uvjeti okoliša	22
Tablica 10. Prikaz pouzdanosti u ovisnosti o faktoru pokrivanja	33
Tablica 11. Rezultati umjeravanja garniture utega br. 1	39
Tablica 12. Rezultati umjeravanja garniture utega br. 2	40

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
C	-	korekcijski faktor dogovorene mase
d	kg	podjeljak vage
E_n	-	faktor slaganja
$\Delta \bar{m}_c$	kg	prosječna razlika u vaganju između referentnog i ispitnog utega, aritmetička sredina iskazanih mjernih rezultata
Δm_{ci}	kg	razlika u vaganju između referentnog i ispitnog utega u pojedinačnom ciklusu mjerenju
δm	kg	najveća dopuštena pogriješka
φ_a	%	relativna vlažnost zraka
i	-	indeks pojedinačnog mjerenja
k	-	faktor pokrivanja
χ	-	magnetska susceptibilnost
M	A m ⁻¹	trajna magnetizacija
m	kg	prava masa
max	kg	maksimalna izvagana vrijednost ispitnog utega
min	kg	minimalna izvagana vrijednost ispitnog utega
m_c	kg	dogovorena ili konvencionalna masa
m_{cr}	kg	dogovorena masa referentnog utega
m_{ct}	kg	dogovorena masa ispitnog utega
m_o	kg	nazivna vrijednost utega
m_r	kg	masa etalona
m_t	kg	masa ispitnog utega
μ	N A ⁻¹	magnetska permeabilnost
μ_0	N A ⁻¹	magnetska permeabilnost vakuuma
$\mu_0 M$	T	magnetska polarizacija
n	-	broj ciklusa mjerenja
p_a	Pa	tlak zraka
R_a	m	srednje aritmetičko odstupanje profila
R_z	m	srednja visina neravnina
ρ_a	kg/m ³	gustoća zraka
ρ_{a1}	kg/m ³	gustoća zraka tijekom prijašnjeg mjerenja referentnog utega
ρ_{max}	kg/m ³	maksimalna gustoća materijala utega
ρ_{min}	kg/m ³	minimalna gustoća materijala utega
ρ_o	kg/m ³	referentna gustoća zraka
$\rho_r = \rho_{ref}$	kg/m ³	gustoća referentnog utega
ρ_t	kg/m ³	gustoća ispitnog utega

ρ_w	kg/m ³	gustoća vode
s	kg	standardna devijacija
ϑ_a	°C	temperatura zraka
U	kg	proširena mjerna nesigurnost
$u(\rho_a)$	kg/m ³	mjerna nesigurnost gustoće zraka
$u(\rho_{\text{ref}})$	kg/m ³	mjerna nesigurnost gustoće referentnog utega
$u(\rho_t)$	kg/m ³	mjerna nesigurnost gustoće ispitnog utega
u_A	kg	mjerna nesigurnost tipa A
u_B	kg	mjerna nesigurnost tipa B
u_b	kg	mjerna nesigurnost zbog utjecaja uzgona
$u_c(m_{\text{cr}})$	kg	mjerna nesigurnost etalona
$u_c(m_t)$	kg	kombinirana mjerna nesigurnost ispitnog utega
u_d	kg	mjerna nesigurnost zbog podjeljka vage
u_{EKS}	kg	mjerna nesigurnost zbog ekscentričnosti vage
u_{hr}	%	mjerna nesigurnost relativne vlažnosti zraka
u_{lab}	kg	mjerna nesigurnost izračunata u laboratoriju
u_p	Pa	mjerna nesigurnost tlaka zraka
u_{ref}	kg	mjerna nesigurnost izračunata u referentnom laboratoriju
$u_s(m_{\text{cr}})$	kg	mjerna nesigurnost drifta etalona
u_t	°C	mjerna nesigurnost temperature zraka
V_r	m ³	volumen referentnog utega (etalona)
V_t	m ³	volumen ispitnog utega
v_I	kg ²	varijanca ponovljivosti
W_1	kg	izvagana vrijednost ispitnog utega na zraku
W_2	kg	izvagana vrijednost ispitnog utega u vodi
X_{lab}	kg	dogovorena masa izmjerena u laboratoriju
X_{ref}	kg	dogovorena masa izmjerena u referentnom laboratoriju

SAŽETAK

Tema ovog završnog rada je *Umjeravanje masa nestandardnih tijela*. U radu je prvo prikazan teorijski pregled mjerenja i umjeravanja mase. Zatim je opisan problem nestandardnih utega odnosno masa nestandardnih tijela koja nisu napravljene prema tehničkim propisima koje izdaje OIML (Međunarodna organizacija za zakonodavno mjeriteljstvo). Kao dodatak tome detaljno je opisan postupak umjeravanja i postupak procjene mjerne nesigurnosti takvih nestandardnih utega. Na kraju rada opisani su rezultati umjeravanja dva seta nestandardnih utega koji su u ovom slučaju utezi za tlačne vage koji se koriste za precizno određivanje efektivnog tlaka.

Ključne riječi: umjeravanje, mjerna nesigurnost, nestandardni utezi

SUMMARY

The theme of this final paper is Calibration of non-standard mass. This paper first presents a theoretical overview of measurement and calibration of weight. After that it is described the problem of non-standard weights or masses of non-standard body that are not made according to technical regulations issued by the OIML (International Organization for legislative metrology). In addition to that it is detailed described procedure of calibration and procedure of measuring uncertainty of such non-standard weights. At the end of the paper are described the calibration results of two sets of non-standard weights which are in this case weights for pressure scales used for the precise determination of the effective pressure.

Key words: calibration , measurement uncertainty , non-standard weights

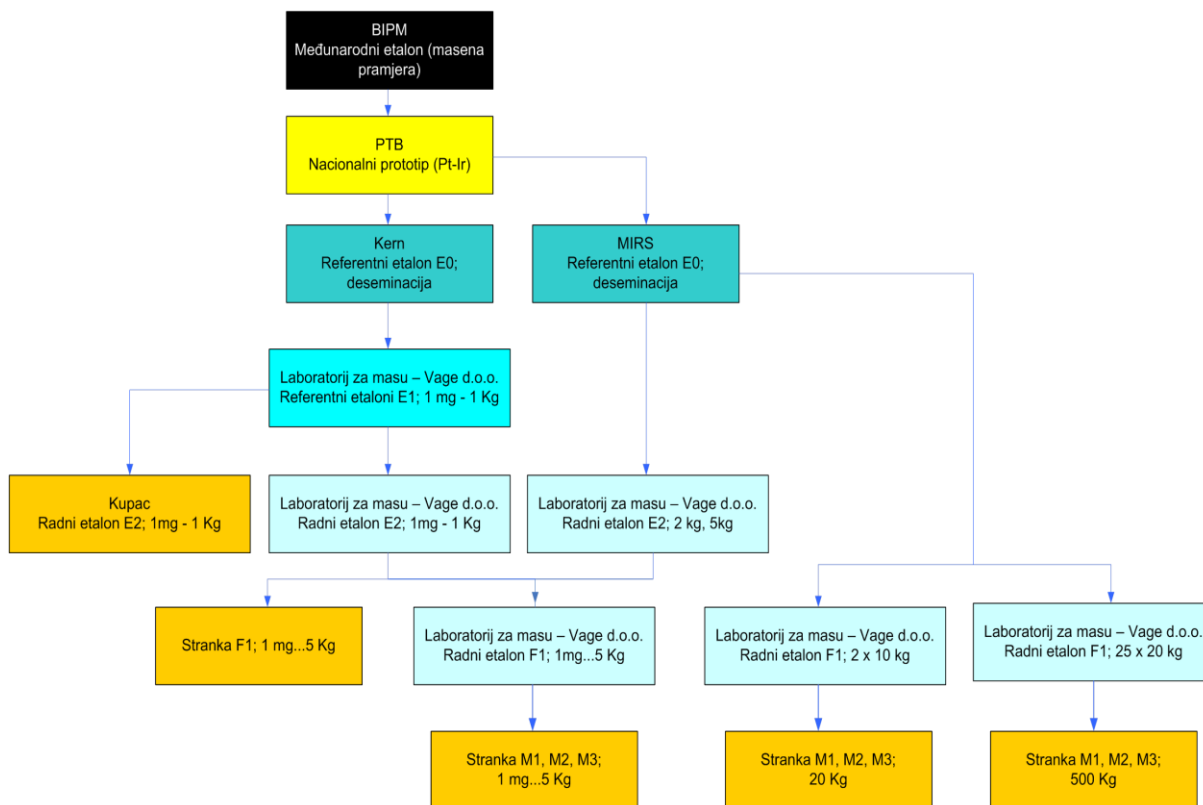
1. UVOD

Mjerenja su važan dio svakodnevnog života jer nam osiguravaju objektivnost, potvrđuju ili opovrgavaju teorijske pretpostavke te nam omogućavaju usporedbu ili predviđanje mnogih događaja. Svaka znanost se danas zasniva na mjerenjima i da nema preciznih i točnih mjerenja ne bi bilo ni razvoja znanosti. Mjerenje je određivanje veličine nekoj pojavi ili nekom objektu. Ta veličina se iskazuje numerički (brojem) i jedinicom određene fizikalne veličine. Masa je fizikalna veličina koja se određuje vaganjem. Vaganje je proces uspoređivanja mase tijela sa masom etalona, tj. masom tijela koja se smatra poznatom. Kako bi se osiguralo što točnije vaganje, svaki etalon odnosno poznata masa mora biti u nekim „granicama točnosti“ što se osigurava umjeravanjem. Danas ne postoje točna i pouzdana mjerenja bez umjeravanja. Umjeravanje je redovito opetovano mjerenje za usporedbu mjerila s mjernim etalonom više točnosti da bi se za navedeno mjerilo dobili podaci o potrebnome ispravku i mjernoj nesigurnosti koju treba uzimati u obzir. Zbog sve bržeg razvoja znanosti i industrije, danas se teži mnogim standardizacijama kako bi se olakšao neki razvojni proces. Tako su se standardizirali i procesi umjeravanja mase. Danas postoje standardizirani etaloni kojima se umjeravaju ispitni utezi koji su zapravo jednaki po svemu etalonima samo što su nižeg razreda točnosti, odnosno imaju veće granice dopuštene pogreške. Problem se javlja ako se treba umjeriti nestandardna masa kao što su npr. utezi za tlačne vage. Zadatak ovog završnog rada je opisati takav jedan nestandardni, odnosno nenormirani postupak umjeravanja, zatim izvršiti umjeravanje na dva asortimana utega za tlačne vage i procijeniti mjernu nesigurnost umjeravanja.

2. TEORIJSKI PREGLED MJERENJA MASE I UMJERAVANJA UTEGA

Prema SI sustavu, kilogram je jednak masi međunarodne pramjere kilograma, oblika valjka visine 39 mm i promjera 39 mm, a načinjen je 1889. godine od legure platine (90 %) i iridija (10 %) i pohranjen u Međunarodnom uredu za mjere i utege (fra. Bureau international des poids et mesures, BIPM). Pramjera kilograma predstavlja primarni etalon od kojeg kreće daljnje mjerenje mase u svim krajevima svijeta. Kilogram je jedina osnovna jedinica SI sustava koja nije dokazana fizikalnim zakonitostima već se radi o jednom utegu koji svake godine mijenja svoju masu zbog malih zrnca prašine koja se skupljaju na njemu i svake godine se rade nova umjeravanja prema tom kilogramu upravo radi te nestabilnosti prautege. Prvi problem koji se trebao riješiti kroz povijest je kako osigurati da recimo 1 kg u nekom laboratoriju u Hrvatskoj ima točno istu masu kao i 1 kg u nekom laboratoriju u Njemačkoj ili bilo kojoj drugoj državi. To se riješilo uvođenjem odgovarajućih mjera, standarda i principa sljedivosti. Utezi su podjeljeni u razrede točnosti od E1, E2, F1, F2, M1, M1 – 2, M2, M2 – 3 do M3. E1 su najkvalitetniji utezi i oni se obično čuvaju u nacionalnim mjeriteljskim institutima i nekada se znaju nazivati i primarni etaloni. Nadalje, uteg koji se čuva u BIPM-u je po tome prvi primarni etalon, a ostali primarni etaloni u nacionalnim mjeriteljskim institutima su njegove kopije i znaju se nazivati još „braća etaloni“. Primarni etaloni su mjerni etaloni tvarne mjere, mjerila, mjerni sustavi ili referentne tvari koje definiraju ili ostvaruju danu mjernu jedinicu te za koje se ne zahtijeva sljedivost. Sljedivost zapravo predstavlja neprekinuti slijed usporedbi mjerenja od primarnih etalona pa sve do nižih razreda etalona koji se koriste u akreditiranim umjernim laboratorijima, unutrašnjim umjernim laboratorijima i za potrebe u industriji. To se mjerenje, koje se redovito ponavlja kako bi se mjerilo uspoređivalo s mjernim etalom više točnosti, naziva umjeravanjem. Umjeravanjem se određuje mjerna nesigurnost koja predstavlja parametar pridružen rezultatu mjerenja koji opisuje rasipanje vrijednosti koje bi se razumno mogle pripisati mjerenoj veličini uz određenu vjerojatnost tj. pouzdanost. Kako bih što bolje opisao sljedivost i dao odgovor na postavljeni problem kako osigurati jednakost 1 kg u laboratoriju u Hrvatskoj i 1 kg u laboratoriju u Njemačkoj opisat ću jedan primjer iz prakse. Recimo u nekoj državi postoji nacionalni mjeriteljski institut i akreditirani umjerni laboratorij. Nacionalni mjeriteljski institut ima primarni etalon klase E1 dok akreditirani umjerni laboratorij ima etalon klase E2 koji treba umjeriti. U ovom slučaju uteg klase E1 je upravo etalon, a uteg klase E2 ovdje zapravo

predstavlja ispitni uteg. Iz ovog primjera htio sam pobliže objasniti razliku između etalona i ispitnog utega. Kao što se može vidjeti u ovom slučaju, jedan etalon može predstavljati upravo etalon, a drugi etalon može predstavljati ispitni uteg kojeg treba umjeriti. Sada kada sam to pobliže objasnio, osiguranje jednakosti 1 kg u laboratoriju u Hrvatskoj i 1 kg u laboratoriju u Njemačkoj se upravo postiže sa sljedivošću, odnosno sumiranjem mjernih nesigurnosti svakog stupnja umjeravanja. Na taj način dobiva se povezanost primarnih etalona u nacionalnim mjeriteljskim institutima i etalona koji se koriste u raznim akreditiranim laboratorijima i industriji. Na kraju se još samo treba dobiti povezanost između dva primarna etalona od dvaju nacionalnih mjeriteljskih instituta, u ovom slučaju od nacionalnog mjeriteljskog instituta Hrvatske i Njemačke, koja se postiže međunarodom usporedbom etalona svih nacionalnih mjeriteljskih instituta. Na slici 1. prikazana je sljedivost preko akreditiranog umjernog laboratorija Vage d.o.o. u kojem sam vršio mjerenja za seminarski rad. Mala zanimljivost je da umjeravanje najpreciznijih etalona poduzeća Vage d.o.o. vrše drugi akreditirani umjerni laboratoriji iz Njemačke i Slovenije, a ne Nacionalni mjeriteljski institut u Hrvatskoj kao što bi zapravo trebalo biti.



Slika 1. Prikaz sljedivosti

Kao što se može vidjeti, mjeriteljska infrastruktura i hijerarhija mjerenja mase je veoma razvijena i uvelike standardizirana. Svaki postupak umjeravanja utega bilo kojeg razreda točnosti je tehnički propisan i primjenjiv u svakoj državi svijeta. Problem nastaje u trenutku kada želimo umjeriti masu nekog nestandardnog tijela za koje ne postoji propisani postupak umjeravanja. U sljedećem poglavlju opisat ću tehničke propise kojih se moraju držati utezi kako bi bili standardizirani, a svako odstupanje od tih tehničkih propisa predstavljat će nestandardne utege za koje ću naknadno opisati postupak umjeravanja i procjene mjerne nesigurnosti.

3. TEHNIČKI PROPISI ZA STANDARDIZIRANE UTEGE

Ove tehničke propise izdala je Međunarodna organizacija za zakonsko mjeriteljstvo (OIML) i kao takvi oni vrijede svugdje u svijetu. U ovom poglavlju izvukao sam one tehničke propise po kojima će se standardizirani utezi razlikovati od nestandardnih utega kako bih što bolje objasnio zašto je zapravo potrebno razviti umjeravanje mase nepoznatog tijela odnosno nestandardnog utega. Svaki nestandardni uteg ne može nikako postati standardiziran, ali preko ovih tehničkih propisa mogli bismo približno vidjeti u koji razred točnosti bi se eventualno takav uteg mogao svrstati prema mjernoj nesigurnosti odnosno parametru koji se izračunava prilikom umjeravanja.

3.1. Područje primjene utega

Ovi tehnički propisi vrijede za utege koji se koriste za umjeravanje i ovjeravanje vage, umjeravanje i ovjeravanje utega nižeg razreda točnosti i vaganje i koji su raspoređeni u E1, E2, F1, F2, M1, M1 – 2, M2, M2 – 3 i M3 razrede točnosti. Razredi točnosti se prema Međunarodnoj organizaciji za zakonodavno mjeriteljstvo (OIML-u) definiraju:

Razred E1:

Utezi namijenjeni za osiguranje sljedivosti između nacionalnog etalona mase (s vrijednostima izvedenim iz međunarodne pramjere kilograma) i utega razreda E2 i nižih razreda. Utezi razreda E1 ili garniture utega moraju biti praćeni potvrdom o umjeravanju.

Razred E2:

Utezi namijenjeni za ovjeravanje ili umjeravanje utega razreda F1 i za uporabu s vagama posebnog razreda točnosti I. Utezi ili garniture utega razreda E2 moraju biti praćeni potvrdom o umjeravanju. Ti se utezi mogu upotrebljavati kao utezi razreda E1 ako zadovoljavaju zahtjeve za hrapavost površine, magnetsku susceptibilnost i magnetizaciju za utege razreda E1 te ako potvrda o umjeravanju daje odgovarajuće podatke.

Razred F1:

Utezi namijenjeni za ovjeravanje ili umjeravanje utega razreda F2 i za uporabu s vagama posebnog razreda točnosti I i razreda II visoke točnosti.

Razred F2:

Utezi namijenjeni za ovjeravanje ili umjeravanje utega razreda M1 i možda razreda M2. Također su namijenjeni za uporabu u važnim trgovačkim transakcijama (npr. plemenitih kovina i dragoga kamenja) s vagama razreda II visoke točnosti.

Razred M1:

Utezi namijenjeni za ovjeravanje ili umjeravanje utega razreda M2 i za uporabu s vagama razreda III srednje točnosti.

Razred M2:

Utezi namijenjeni za ovjeravanje ili umjeravanje utega razreda M3 i za uporabu u uobičajenim trgovačkim transakcijama i s vagama razreda III srednje točnosti.

Razred M3:

Utezi namijenjeni za uporabu s vagama razreda III srednje točnosti i običnim vagama razreda točnosti III.

Razred M1–2 i M2–3:

Utezi od 50 kg do 5000 kg niže točnosti namijenjeni su za uporabu s vagama razreda III srednje točnosti.

3.2. Najveće dopuštene pogreške pri ovjeravanju utega

Ovjeravanje čine sve radnje koje provodi tijelo nacionalne službe zakonskog mjeriteljstva (ili druga zakonski ovlaštena organizacija) čija je svrha ispitivanje i utvrđivanje da uteg u potpunosti zadovoljava zahtjeve propisa za ovjeravanje. Ovjeravanje obuhvaća ispitivanje i žigosanje. Postoji prvo ovjeravanje i naknadno ovjeravanje. Prvo ovjeravanje predstavlja niz ispitivanja i vizualnih provjera koji se provode prije nego što se oprema/uteg stavi u funkciju kako bi se odredilo jesu li uteg ili garnitura utega proizvedeni kako bi replicirali dani tip, jesu li u skladu s tim tipom i propisima te leže li njihove mjeriteljske značajke u granicama koje se zahtijevaju za prvo ovjeravanje kopija toga tipa. Ako utezi ili garnitura utega prođu sva ispitivanja i provjere, daje im se zakoniti karakter njihovim prihvaćanjem koje se potvrđuje žigosanjem i/ili izdavanjem potvrde o ovjeravanju. Naknadno ovjeravanje pak predstavlja niz

ispitivanja i vizualnih provjera, koje također provodi službenik službe zakonskog mjeriteljstva (inspektor), kako bi utvrdio da li uteg ili garnitura utega, koji su određeno vrijeme od prethodnog ovjeravanja bili u uporabi, i dalje zadovoljavaju, ili su ponovno zadovoljili propise, te da zadržavaju svoje mjeriteljske značajke u zahtijevanim granicama. Ako utezi ili garnitura utega prođu sva ispitivanja i provjere, njihov se zakoniti karakter potvrđuje ili ponovno uspostavlja njihovim prihvaćanjem koje se potvrđuje žigosanjem i/ili izdavanjem potvrde o ovjeravanju.

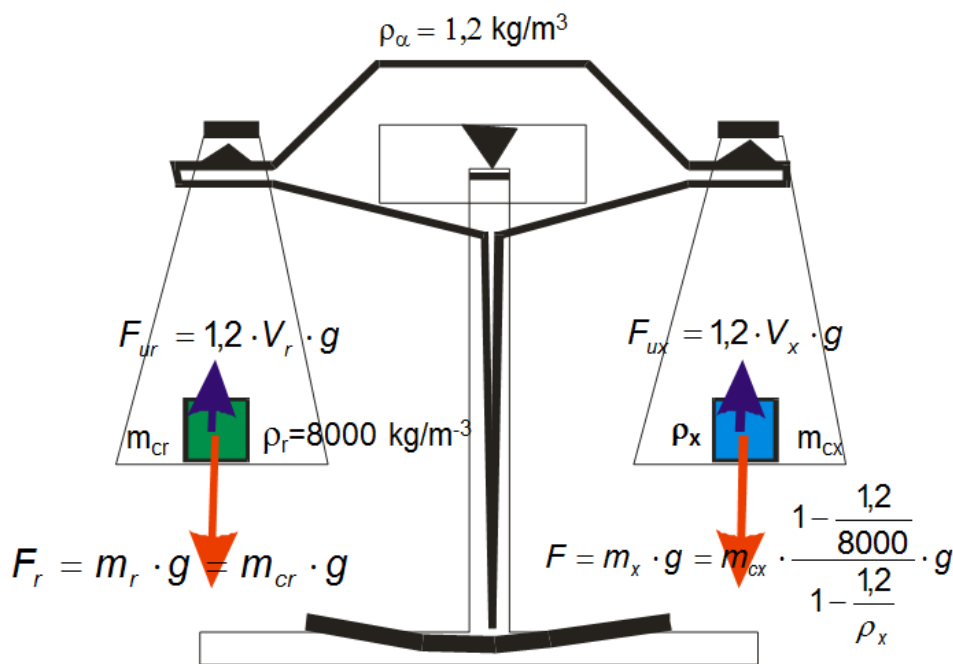
3.2.1. Najveće dopuštene pogriješke pri prvom ovjeravanju

Najveće dopuštene pogriješke pri prvome ovjeravanju pojedinačnih utega dane se u tablici 1., a odnose se na dogovorenu masu:

Tablica 1. Najveće dopuštene pogriješke za utege ($\pm \delta m$ u mg)

Nazivna vrijednost ^a	Razred E ₁	Razred E ₂	Razred F ₁	Razred F ₂	Razred M ₁	Razred M _{1,2}	Razred M ₂	Razred M _{2,3}	Razred M ₃
5 000 kg			25 000	80 000	250 000	500 000	800 000	1 600 000	2 500 000
2 000 kg			10 000	30 000	100 000	200 000	300 000	600 000	1 000 000
1 000 kg		1 600	5 000	16 000	50 000	100 000	160 000	300 000	500 000
500 kg		800	2 500	8 000	25 000	50 000	80 000	160 000	250 000
200 kg		300	1 000	3 000	10 000	20 000	30 000	60 000	100 000
100 kg		160	500	1 600	5 000	10 000	16 000	30 000	50 000
50 kg	25	80	250	800	2 500	5 000	8 000	16 000	25 000
20 kg	10	30	100	300	1 000		3 000		10 000
10 kg	5	16	50	160	500		1 600		5 000
5 kg	2,5	8,0	25	80	250		800		2 500
2 kg	1,0	3,0	10	30	100		300		1 000
1 kg	0,5	1,0	5,0	16	50		160		500
500 g	0,25	0,8	2,5	8,0	25		80		250
200 g	0,10	0,3	1,0	3,0	10		30		100
100 g	0,05	0,16	0,5	1,6	5,0		16		50
50 g	0,03	0,10	0,3	1,0	3,0		10		30
20 g	0,025	0,08	0,25	0,8	2,5		8,0		25
10 g	0,020	0,06	0,20	0,6	2,0		6,0		20
5 g	0,016	0,05	0,16	0,5	1,6		5,0		15
2 g	0,012	0,04	0,12	0,4	1,2		4,0		12
1 g	0,010	0,03	0,10	0,3	1,0		3,0		10
500 mg	0,008	0,025	0,08	0,25	0,8		2,5		
200 mg	0,006	0,020	0,06	0,20	0,6		2,0		
100 mg	0,005	0,016	0,05	0,16	0,5		1,6		
50 mg	0,004	0,012	0,04	0,12	0,4				
20 mg	0,003	0,010	0,03	0,10	0,3				
10 mg	0,003	0,008	0,025	0,08	0,25				
5 mg	0,003	0,006	0,020	0,06	0,20				
2 mg	0,003	0,006	0,020	0,06	0,20				
1 mg	0,003	0,006	0,020	0,06	0,20				

Dogovorena ili konvencionalna masa utega dobiva se vaganjem u zraku u skladu s međunarodnom preporukom OIML R 33, „Dogovorena vrijednost rezultata vaganja u zraku“. Dogovorena masa utega važan je parametar koji piše u svakoj umjernici nakon provedenog postupka umjeravanja. Za uteg uzet na referentnoj temperaturi od 20 °C dogovorena masa jednaka je masi referentnog utega gustoće (ρ_r) od 8 000 kg/m⁻³ koja uravnotežuje taj uteg u zraku gustoće (ρ_o) od 1,2 kg/m⁻³. Na slici 2. može se vidjeti jedan takav primjer vaganja u zraku preko kojeg se određuje dogovorena ili konvencionalna masa.



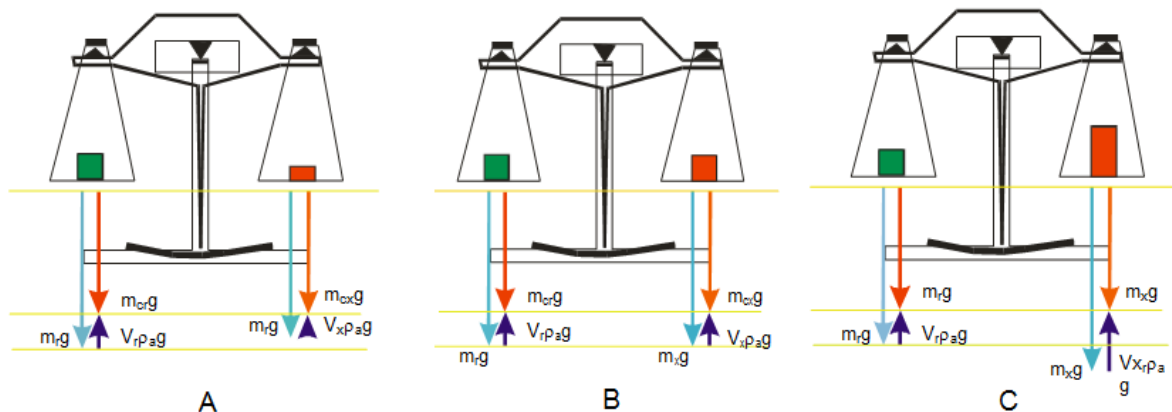
Slika 2. Vaganje u zraku

Dogovorena masa m_c (određena s povećanom nesigurnošću U) ne smije se niti za jedan uteg razlikovati od nazivne vrijednosti utega (m_o) za vrijednost veću od razlike između najveće dopuštene pogreške δm i povećane nesigurnosti:

$$m_o - (\delta m - U) \leq m_c \leq m_o + (\delta m - U) \quad \text{Jednadžba 3.1}$$

$$U = \delta m / 3 \quad \text{Jednadžba 3.2}$$

Osim dogovorene ili konvencionalne mase utega postoji termin tzv. prave mase utega. Koncept prave mase (mase u vakuumu) je hipotetska usporedba mase prema etalonu (poznata vrijednost) idealnom ravnokrakom vagom u idealnom vakuumu. Na slici 3. mogu se vidjeti tri različiti slučaja vaganja u idealnom vakuumu.



Slika 3. Vaganje u vakuumu

Kao što se može zaključiti, kada se mjeri masa u vakuumu tada ne postoji utjecaj uzgona zraka na utege, stoga ne postoje uzgonske komponente sila prema gore koje se mogu vidjeti kod vaganja u zraku na slici 2. Na slici 3. koja prikazuje vaganje u vakuumu također su naznačene komponente uzgona, ali te komponente zapravo ne postoje. Naime, preko njih se želi objasniti kontraefekt koji se događa prilikom mjerenja mase u vakuumu. Recimo, za slučaj A, kada je etalon (zeleni uteg) volumno veći od ispitnog utega (narančasti uteg), ali su utezi iste mase, tada će uzgonska komponenta etalona prilikom mjerenja mase na zraku biti veća od uzgonske komponente ispitnog utega i kada bi se masa uspoređivala na zraku tada bi etalonski uteg zapravo bio lakši od ispitnog utega jer bi puno veći utjecaj uzgon imao na etalon nego na ispitni uteg, dok je kod mjerenja u vakuumu zapravo obrnuto. Kod mjerenja u vakuumu sile uzgona ne postoje i zapravo takvim poništavanjem dogodit će se da će prava masa etalona biti veća od prave mase ispitnog utega. To je lijepo prikazano na slici 3. preko sila. Narančaste strelice prema dolje prikazuju sile koje stvaraju nazivne mase utega, tamno plave strelice prikazuju sile uzgona koje zapravo ne postoje, ali zbog gore opisanog efekta te uzgonske komponente povećavaju masu utega i na taj način se dobiva prava masa utega čije sile su prikazane svijetlo plavom bojom. Za slučaj B i C vrijede iste zakonitosti kao i za slučaj A. Veza između prave i dogovorene mase prikazana je sljedećom jednačinom:

$$m_c = m * \left[1 - 1,2 * \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{8000} \right) \right] \quad \text{Jednadžba 3.3}$$

Nekada u starim umjernicama može biti prikazana prava masa sa mjernom nesigurnosti i tada se prava masa obično prebacuje u konvencionalnu masu.

3.2.2. Najveće dopuštene pogriješke pri naknadnom ovjeravanju

Određivanje najveće dopuštene pogriješke pri naknadnome ovjeravanju ili pri ovjeravanju u radu pravo je svake države. Ako su međutim dopuštene veće pogriješke od najvećih dopuštenih pogriješaka danih u tablici 1., za uteg se ne može deklarirati da pripada odgovarajućemu OIML razredu.

3.3. Oblik utega

Utezi moraju imati jednostavan geometrijski oblik da bi se olakšala njihova proizvodnja, ne smiju imati oštre bridove kako bi se spriječilo njihovo habanje te ne smiju imati izražene udubine kako bi se izbjeglo taloženje (npr. prašine) na njihovoj površini. Utezi iz dane garniture utega moraju imati isti oblik, osim utega od 1 g ili manjih kojima su oblici posebno propisani.

3.3.1. Utezi od 1 gram ili manji

Utezi manji ili jednaki 1 g moraju biti ravne mnogokutne pločice ili žice, čiji je oblik u skladu s tablicom 2., koje omogućuju lako rukovanje. Naime, takvi utezi su jako mali i kada se s njima rukuje mora ih se prenositi pincetom, a to bi bilo puno teže da nisu napravljeni prema propisanom obliku.

Tablica 2. Oblici utega od 1 g ili manjih

Nazivna vrijednost	Mnogokutne pločice	Žice		
5, 50, 500 mg	peterokut	Peterokut	ili	5 odsječaka
2, 20, 200 mg	čtetvorina	Četvorina		2 odsječaka
1, 10, 100, 1000 mg	trokut	Trokut		1 odsječak

3.3.2. Utezi od 1 gram do 50 kilograma

Utezi nazivnih vrijednosti od 1 g do 50 kg imaju točno propisane vanjske dimenzije koje se mogu vidjeti u međunarodnom dokumentu OIML R 111-1. Ti utezi mogu također imati valjkasto ili blago stožasto tijelo. Visina tijela mora biti približno jednaka srednjoj vrijednosti promjera; visina mora biti između $3/4$ i $5/4$ toga promjera.

3.3.3. Utezi od 50 kilograma ili veći

Utezi od 50 kg ili veći mogu imati valjkasti, pravokutni ili drugi prikladan oblik. Za oblik se mora predvidjeti sigurno skladištenje i rukovanje. Utezi od 50 kg ili veći mogu imati krute uređaje za rukovanje kao što su osovine, ručice, kuke, izrezi itd.

3.4. Materijal utega

Materijal utega i oblik utega su dva najstroža tehnička propisa koje moraju zadovoljiti utezi kako bi bili standardizirani odnosno kako bi mogli biti svrstani u određeni razred točnosti utega.

3.4.1. Utezi razreda E

Utezi razreda E su utezi najveće kvalitete i točnosti i takvi utezi moraju biti napravljeni od posebnih materijala koji su dugotrajniji i otporniji. Tvrdća materijala i njegova otpornost na habanje moraju biti najmanje jednake tvrdoći i otpornosti austenitnog nehrđajućeg čelika.

3.4.2. Utezi razreda F

Površina utega razreda F od 1 g ili većih može se obrađivati prikladnim kovinskim premazom kako bi se poboljšala njezina otpornost na koroziju i tvrdoća. Tvrdća i lomljivost materijala koji se upotrebljava za utege razreda F od 1 g ili veće mora biti barem jednaka tvrdoći i lomljivosti vučene mjedi. Tvrdća i lomljivost materijala koji se upotrebljava za utege razreda F od 50 kg ili veće za cijelo tijelo ili za vanjske površine mora biti barem jednaka tvrdoći i lomljivosti nehrđajućeg čelika.

3.4.3. Utezi razreda M od 50 kilograma ili manji

Površina utega od 1 g ili većih može se obrađivati prikladnim kovinskim premazom kako bi se poboljšala njezina otpornost na koroziju i tvrdoća. Utezi razreda M manji od 1 g moraju posebno biti izrađeni od materijala koji je dovoljno otporan na hrđanje i oksidaciju. Valjkasti utezi razreda M1 manji od 5 kg i utezi razreda M2 i M3 manji od 100 g moraju biti izrađeni od mjedi ili gradiva čija je tvrdoća i otpornost na hrđanje slična onoj od mjedi ili bolja od nje. Drugi valjkasti utezi kao i utezi u obliku kvadra razreda M1, M2 i M3 od 5 kg do 50 kg

moraju biti izrađeni od sivog kovanog željeza ili drugoga gradiva čija je lomljivost i otpornost na koroziju slična onoj sivog kovanog željeza ili bolja od nje.

3.4.4. Utezi razreda M veći od 50 kilograma

Površina utega može se obrađivati prikladnim premazom kako bi se poboljšala njezina otpornost na koroziju. Taj premaz mora izdržati udare i vanjske vremenske uvjete. Utezi moraju biti izrađeni od sivog kovanog željeza ili drugog gradiva čija je lomljivost i otpornost na koroziju slična onoj sivog kovanog željeza ili bolja od nje. Materijal ovakvih utega mora biti takve tvrdoće i čvrstoće da izdrži udare koji se mogu pojaviti u normalnim uvjetima uporabe. Ručice pravokutnih utega moraju također biti izrađene od bešavne čelične cijevi ili od lijevanog željeza kao što su i kod utega razreda M, ali manjih od 50 kilograma.

3.5. Magnetizam utega

Magnetizam utega se opisuje sa dva magnetska svojstva, a to su trajna magnetizacija i magnetska susceptibilnost. Ako su magnetska djelovanja zanemariva, tj. ako su trajna magnetizacija (M) utega i magnetska susceptibilnost (χ) dostatno malene i ako je vaga umjerena s pomoću referentnih utega dobro poznate mase, tada se može pretpostaviti da su sastavnice nesigurnosti zbog magnetizma utega zanemarive.

3.5.1. Trajna magnetizacija utega

Trajna magnetizacija (M) je parametar koji specificira magnetsko stanje tijela kao što su utezi kada ne postoji magnetsko polje (najopćenitije, magnetizacija je vektor čija apsolutna vrijednost i smjer u gradivu nisu nužno stalni). Trajna magnetizacija tijela stvara nehomogeno magnetsko polje u prostoru i prema tome proizvodi magnetske sile na druga tijela oko njega kao što je to recimo vaga i upravo zbog toga može nastati pogreška u mjerenju. Trajna magnetizacija (M) izražena s pomoću polarizacije ($\mu_0 M$) odnosno umnoška magnetske permeabilnosti vakuuma i trajne magnetizacije, ne smije prelaziti vrijednosti dane u tablici 3.

Tablica 3. Maksimalna polarizacija, $\mu_0 M$

Razred utega	E_1	E_2	F_1	F_2	M_1	M_{1-2}	M_2	M_{2-3}	M_3
Max. polarizacija, $\mu_0 M$	2,5	8	25	80	250	500	800	1600	2500

3.5.2. Magnetska susceptibilnost utega

Osim magnetizacije, na mjerenje mase utega utječe i magnetska susceptibilnost. Magnetska susceptibilnost je mjera sposobnosti sredstva da mijenja magnetsko polje. Ona je povezana s magnetskom permeabilnošću (μ) relacijom: $\mu/\mu_0 = 1 + \chi$. Magnetska susceptibilnost utega ne smije prelaziti vrijednosti dane u tablici 4.

Tablica 4. Maksimalna susceptibilnost (χ)

Razred utega	E ₁	E ₂	F ₁	F ₂
$m \leq 1 \text{ g}$	0,25	0,9	10	-
$2 \text{ g} \leq m \leq 10 \text{ g}$	0,06	0,18	0,7	4
$20 \text{ g} \leq m$	0,02	0,07	0,2	0,8

3.6. Gustoća materijala utega

Gustoća materijala koji se upotrebljava za utege specificirana je u tablici 5. i mora biti takva da odstupanje od 10% od utvrđene gustoće zraka ($1,2 \text{ kg/m}^3$) ne izaziva pogrešku koja prelazi četvrtinu najveće dopuštene pogreške. Te se dopuštene pogreške vide u tablici 1.

Tablica 5. Najmanje i najveće granice gustoće materijala utega (ρ_{\min}, ρ_{\max})

Nazivna vrijednost	$\rho_{\min}, \rho_{\max} (10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3})$							
	Razred utega (za razred M ₃ , nisu specificirane nikakve vrijednosti)							
	E ₁	E ₂	F ₁	F ₂	M ₁	M ₁₋₂	M ₂	M ₂₋₃
$\geq 100 \text{ g}$	7,934–8,067	7,81–8,21	7,39–8,73	6,4–10,7	$\geq 4,4$	$> 3,0$	$\geq 2,3$	$\geq 1,5$
50 g	7,92–8,08	7,74–8,28	7,27–8,89	6,0–12,0	$\geq 4,0$			
20 g	7,84–8,17	7,50–8,57	6,6–10,1	4,8–24,0	$\geq 2,6$			
10 g	7,74–8,28	7,27–8,89	6,0–12,0	$\geq 4,0$	$\geq 2,0$			
5 g	7,62–8,42	6,9–9,6	5,3–16,0	$\geq 3,0$				
2 g	7,27–8,89	6,0–12,0	$\geq 4,0$	$\geq 2,0$				
1 g	6,9–9,6	5,3–16,0	$\geq 3,0$					
500 mg	6,3–10,9	$\geq 4,4$	$\geq 2,2$					
200 mg	5,3–16,0	$\geq 3,0$						
100 mg	$\geq 4,4$							
50 mg	$\geq 3,4$							
20 mg	$\geq 2,3$							

Ako gustoća zraka (ρ_a) odstupa od referentne gustoće $\rho_o = 1,2 \text{ kg/m}^3$ za više od $\pm 10 \%$, a gustoća ispitnog utega (ρ_t) odstupa od referentne gustoće (ρ_{ref}), dogovorena masa može se ispraviti za korekcijski faktor C na sljedeći način:

$$m_{\text{ct}} = m_{\text{cr}}(1 + C) + \Delta\bar{m}_c \quad \text{Jednadžba 3.4}$$

$$C = (\rho_{\text{ref}} - \rho_t) \left[\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_{\text{ref}}} \right] \quad \text{Jednadžba 3.5}$$

gdje je $\Delta\bar{m}_c$ prosječna razlika u vaganju koja se opaža između ispitnog i referentnog utega, ρ_{ref} gustoća referentnog utega i m_{ct} i m_{cr} redom su dogovorene mase ispitnih i referentnih utega. Kada se upotrebljava dogovorena masa utega, na mjernu pogrešku mogu utjecati nadmorska visina i odgovarajuće promjene u gustoći zraka; prema tome mora se upotrijebiti ispravak zbog uzgona kojeg prikazuju gore navedene dvije jednadžbe. Ako se utezi razreda E upotrebljavaju iznad 330 m, zajedno s njihovom mjernom nesigurnošću mora se dati i gustoća utega. Za uteg razreda F1 to vrijedi iznad 800 m.

3.7. Stanje površine utega

Stabilnost mase utega veoma ovisi o strukturi površine utega. Očekuje se da uteg s glatkom površinom bude stabilniji od utega s hrapavom površinom, ako su svi drugi elementi isti. Važno je da površina utega bude čista kada se vrednuje hrapavost njegove površine. U normalnim uvjetima uporabe, kakvoće površina moraju biti takve da svaka promjena mase utega bude zanemariva u odnosu na najveću dopuštenu pogrešku. Površina utega (uključujući osnovicu i vrhove) mora biti glatka, a bridovi zaobljeni. Površina utega razreda E i F ne smije imati pukotine te kada se vizualno provjerava mora imati gladak izgled. Vizualno promatranje može biti dostatno, osim u slučaju sumnje ili spora. U tome se slučaju moraju upotrebljavati vrijednosti dane u tablici 6. Površina utega razreda M1, M2 i M3 od 1 g do 50 kg mora biti glatka i kada se vizualno provjerava, ne smiju se opažati pore.

Tablica 6. Najveće vrijednosti hrapavosti površine

Razred:	E ₁	E ₂	F ₁	F ₂
$R_z(\mu\text{m})$:	0,5	1	2	5
$R_a(\mu\text{m})$:	0,1	0,2	0,4	1

4. RADNA UPUTA ZA UMJERAVANJE NESTANDARDNIH UTEGA

U ovom i sljedećem poglavlju rješavati ću problem ovog završnog rada. Ovom radnom uputom želim korak po korak prikazati način umjeravanja utega nestandardiziranih masa u laboratoriju. Kako bi se proveo jedan postupak umjeravanja nestandardnog utega moramo imati odgovarano osoblje i opremu za izvršavanje postupka umjeravanja. Prije nego što se krene sa umjeravanjem nestandardnog utega, moraju se obaviti nekakve pripremne radnje na utegu i uređaju za mjerenja mase (vaga). Za postupak umjeravanja nestandardnog utega moraju postojati određeni uvjeti okoliša i metoda po kojoj će se umjeravati, a na kraju postupka umjeravanja mora se prikladno označiti uteg koji je umjeren.

4.1. Potrebno osoblje i oprema

4.1.1. Potrebno osoblje

Za potrebe umjeravanja nestandardnog utega potreban nam je obrazovani djelatnik laboratorija za masu, drugim riječima mjeritelj, osposobljen za umjeravanje takvih nestandardnih utega.

4.1.2. Potrebna oprema

Za umjeravanje utega nestandardnih masa potrebna je sljedeća oprema:

- ispitna vaga – komparator
- etalonski utezi razreda točnosti koji je ovisan o mjernoj nesigurnosti koju želimo postići
- Dataloger (mjeri temperaturu, vlagu i tlak).
- indikator susceptibilnosti (ispituje permeabilitet utega) – koristi se samo prilikom umjeravanja nestandardnih utega kada želimo postići mjernu nesigurnost utega klase E2, F1, F2.

Nestandardni utezi se ne mogu svrstati u određeni razred točnosti utega odnosno ne mogu se standardizirati, ali se njihova mjerna nesigurnost može doslovno „dotjerati“ prema određenom razredu točnosti utega.

Za potrebe mjerenja za ovaj završni rad koristio sam 3 vage. Za najmanje nestandardne utege čija je masa manja od 200 grama koristio sam vagu HP 220 DC (slika 4).



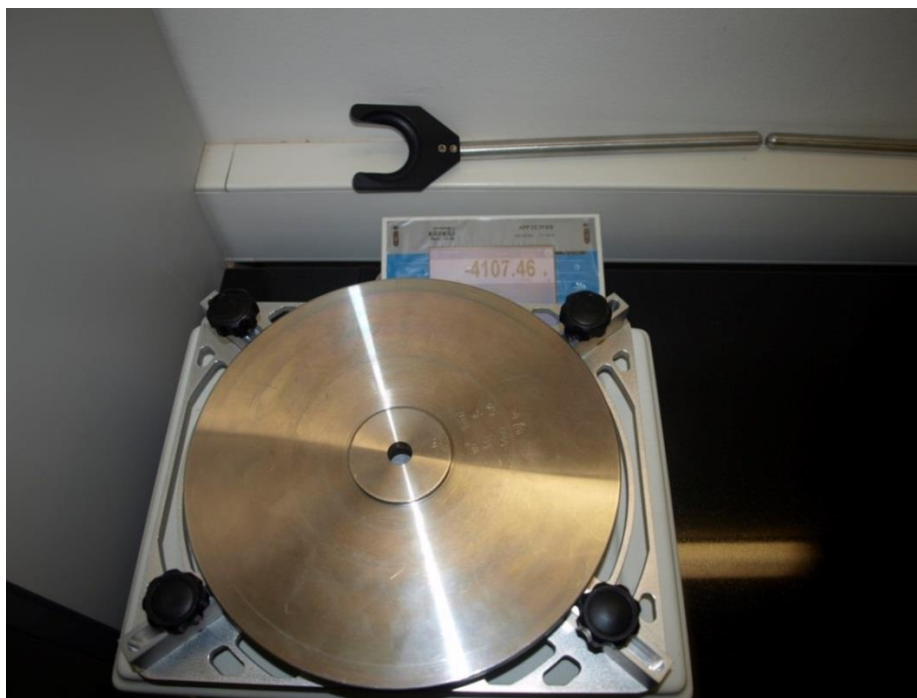
Slika 4. Vaga HP 220 DC

Za utege mase između 200 grama i 5000 grama koristio sam vagu PR 5003 (slika 5.).



Slika 5. Vaga PR 5003

Za nestandardne utege mase veće od 5000 grama koristio sam vagu APP 25 (slika 6.). Koristio sam tri vage jer svaka od njih daje najbolje i najpreciznije rezultate u svojem području mjerenja, a uz to vage koje se koriste za manje mase, kao što je HP 220 DC, nemaju mogućnost mjerenja većih masa od 200 grama.



Slika 6. Vaga APP 25

U završnom radu trebam odrediti mjernu nesigurnost nestandardnih utega. Kao što sam već u par navrata napisao, nestandardni utezi nikad neće moći spadati u neku klasu standardnih utega, ali se njihova mjerna nesigurnost uvijek može izračunati da bude u nekoj određenoj klasi u kojoj mi želimo da bude. Za potrebe ovoga rada odlučio sam umjeriti utege u klasi M1 tako da njihova mjerna nesigurnost bude klase F2. Prema OIML-u, ako se želi umjeriti određeni uteg u određenoj klasi, uvijek mu se njegova mjerna nesigurnost mora prikazati u klasi iznad. Odlučio sam umjeriti garniture utega u M1 klasi upravo radi toga jer garniture utega nisu bile baš očuvane, imale su dosta ogrebotina, nečistoća i bile su dosta stare. Jedna garnitura je stara između 10 i 15 godina dok je druga stara između 5 i 10 godina. Uz to, specifikacije opreme koju sam koristio pri umjeravanju (podjeljak vage), ne dozvoljava da utezi budu umjereni u većoj klasi. Kako bih odredio mjernu nesigurnost nestandardnih utega F2 razreda točnosti, trebam uspoređivati masu nestandardnih utega sa standardnim etalonima više, odnosno točnije F1 klase (slika 7.) prema metodi ABBA koja će naknadno biti opisana u ovom poglavlju.



Slika 7. Etaloni F1 klase

4.2. Pripremne radnje

4.2.1. Čišćenje utega

Prije samog postupka umjeravanja utega potrebno je pregledati i po potrebi ukloniti sve nečistoće koje bi mogle utjecati na točnost mjerenja. Prilikom čišćenja treba koristiti sredstva koja neće oštetiti utege kao što su npr. destilirana voda, alkohol ili neko drugo sredstvo za čišćenje. Nakon čišćenja potrebno je određeno vrijeme ostaviti uteg u mirovanju. To određeno vrijeme naziva se vrijeme stabilizacije nakon čišćenja utega. Čistio sam utege sa destiliranom vodom i prema M1 razredu točnosti utega (tablica 7.) čekao sam sat vremena da se utezi stabiliziraju kako bih mogao obaviti mjerenja.

Tablica 7. Vrijeme stabilizacije nakon čišćenja utega

Razred točnosti utega	E2	F1	F2 do M3
Nakon čišćenja s alkoholom	6 dana	2 dana	1 sat
Nakon čišćenja s destiliranom vodom	3 dana	1 dan	1 sat

4.2.2. Aklimatizacija utega

Prije umjeravanja potrebno je aklimatizirati utege na radnu temperaturu laboratorija. Vrijeme aklimatizacije utega zadano je u tablici 8. i određuje se prema nazivnoj vrijednosti utega i klasi utega koju se želi postići umjeravanjem nestandardnih utega.

Tablica 8. Vrijeme aklimatizacije ili temperaturna stabilizacija utega u satima

ΔT	Nazivna vrijednost	Klasa utega E2	Klasa utega F1	Klase utega F2 do M3
$\pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	10, 20, 50 kg	-	12	3
	1, 2, 5 kg	12	6	2
	100, 200, 500 g	5	3	1
	10, 20, 50 g	2	1	0,5
	< 10 g	1	1	0,5
$\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$	10, 20, 50 kg	-	4	1
	1, 2, 5 kg	8	3	1
	100, 200, 500 g	4	2	0,5
	10, 20, 50 g	1	1	0,5
	< 10 g	0,5	0,5	0,5
$\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$	10, 20, 50 kg	-	1	0,5
	1, 2, 5 kg	5	1	0,5
	100, 200, 500 g	3	1	0,5
	< 100 g	1	1	0,5
$\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$	10, 20, 50 kg	-	0,5	0,5
	1, 2, 5 kg	1	0,5	0,5
	100, 200, 500 g	1	0,5	0,5
	< 100 g	1	0,5	0,5

4.2.3. Pregled vage

Prije samog postupka umjeravanja nestandardnog utega treba provjeriti ispravnost i funkcionalnost vage (komparatora). Potrebno je namjestiti vagu u ravnotežni položaj što se postiže sa libelom koja se nalazi na svakoj vagi. Kada se vaga namjesti u ravnotežni položaj, uključi se te se mora zagrijati, a ako je duže vrijeme već bila upaljena onda se kreće na predopterećenje i provjeru točnosti vage.

4.2.4. Zagrijavanje vage

Vaga treba biti uključena minimalno 30 minuta (ili više ako je tako propisao proizvođač) prije početka umjeravanja.

4.2.5. Predopterećenje i provjera točnosti vage

Prije nego se započne umjeravanje nestandardnog utega, vagu treba jednokratno predopteretiti s oko 80 posto maksimalnog opterećenja ili većim opterećenjem. Nakon što se vaga predoptereti potrebno je provjeriti točnost pokazivanja vage s maksimalnim opterećenjem i s onim opterećenjima u kojima se provodi umjeravanje nestandardnog utega s tom vagom.

4.2.6. Ispitivanje ponovljivosti vage

Za ispitivanje ponovljivosti potrebno je učiniti minimalno 10 mjerenja. Za ispitni teret P za ispitivanje ponovljivosti vage koristi se uteg od 10 kg ukoliko će se vršiti umjeravanje nestandardnog utega do 10 kg, te 20 kg ukoliko će se vršiti umjeravanje utega do 20 kg. Za umjeravanje nestandardnih utega do 500 kg, koristi se uteg od 500 kg.

Postupak:

- Postaviti vagu u ispravan položaj nule
- Postaviti opterećenje P centrično na prijemnik opterećenja
- Zapisati rezultati
- Ukloniti opterećenje
- Provjeriti da li se vaga vratila u nulu, a ako nije treba nulirati vagu

Ponoviti gore opisani postupak za svako mjerenje.

Prije umjeravanja potrebno je izračunati ponovljivost vage, te odrediti da li dobivena ponovljivost odgovara propisanim uvjetima. Ponovljivost vage se računa prema izrazima:

$$\Delta\bar{m}_c = \frac{1}{n} * \sum_{i=0}^n \Delta\bar{m}_{ci} \quad \text{Jednadžba 4.1}$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum_{i=0}^n (\Delta m_{ci} - \Delta\bar{m}_c)^2} \quad \text{Jednadžba 4.2}$$

$$v_I = s^2 \quad \text{Jednadžba 4.3}$$

gdje je:

i	indeks pojedinačnog mjerenja
n	broj mjerenja
$\Delta\bar{m}_{ci}$	iskazani (pokazani) mjerni rezultat
$\Delta\bar{m}_c$	aritmetička sredina iskazanih mjernih rezultata
s	standardna devijacija
v_I	varijanca ponovljivosti

Granice prihvatljivosti ponovljivosti vage su sljedeće:

Ponovljivost vage mora biti za 10 kg utege $s \leq 0,06 \text{ g}$

Ponovljivost vage mora biti za 20 kg utege $s \leq 0,12 \text{ g}$

Ponovljivost vage mora biti za 500 kg utege $s \leq 3 \text{ g}$

4.3. Uvjeti okoliša

Umjeravanje nestandardnog utega mora se obaviti u stabilnim uvjetima atmosferskog tlaka, vlažnosti i temperature. Propisana je temperatura i vlažnost radnog prostora u laboratoriju. Za umjeravanje nestandardnih utega temperatura u laboratoriju mora biti između 17 °C i 27 °C dok se relativna vlažnost mora održavati u rasponu od 40% do 60%. Ono što je bitno za naglasiti je da se promjena relativne temperature i relativne vlažnosti tijekom umjeravanja treba održavati u određenim granicama koje će ovisiti također o postignutom razredu točnosti mjerne nesigurnosti. Prikaz granica može se vidjeti u tablici 9. Dok sam provodio mjerenja, temperatura zraka u laboratoriju iznosila je 21 °C, a relativna vlažnost iznosila je 48%. Promjena temperature i relativne vlažnosti bila je u granicama za E2 i E1 postignuti razred točnosti mjerne nesigurnosti (tablica 9.) jer je laboratorij za masu od tvrtke Vage d.o.o. opskrbljen sa klimatizacijskim sustavom koji mora omogućavati takvu regulaciju temperature i relativne vlažnosti zraka da se mogu umjeravati i utezi E2 i E1 klase prema potrebi.

Tablica 9. Uvjeti okoliša

Postignuti razred točnosti utega	Promjena temperature tijekom umjeravanja	Promjena relativne vlažnosti tijekom umjeravanja
E2, E1	$\pm 0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ tijekom jednog sata; $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ tijekom 12 sati	10% unutar 4 sata
F1	$\pm 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ tijekom jednog sata; maksimalna promjena $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ tijekom 12 sati	15% tijekom 4 sata
F2	$\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ tijekom jednog sata; maksimalna promjena $\pm 3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ tijekom 12 sati	15% tijekom 4 sata
M1	$\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ tijekom jednog sata; maksimalna promjena $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ tijekom 12 sati	-

Za postignute mjerne nesigurnosti nižeg razreda točnosti od M1 ne postoje posebni zahtjevi na uvjete okoliša.

4.4. Postupak umjeravanja utega metodom ABBA

Kod postupka umjeravanja standardiziranih utega uspoređuju se utezi tako da je nazivna vrijednost ispitnog utega jednaka nazivnoj vrijednosti etalona. Kod nestandardnih utega se javlja problem jer nema standardiziranog etalona po kojem će se uspoređivati tijelo nestandardne mase, stoga se za uspoređivanje koristi više etalona čiji će zbroj masa dati približno jednaku masu našem nestandardnom utegu. ABBA zapravo predstavlja niz postavljanja etalona i ispitnog utega. Prvo se stavlja etalon = A, pa zatim ispitni uteg = B, pa opet ispitni uteg = B, pa opet etalon = A. Vremenski intervali između postavljanja utega na prijemnik opterećenja i očitavanja rezultata moraju biti jednaki i otprilike iznose 10-ak sekundi. Potreban broj ciklusa ABBA metode ovisi o mjernoj nesigurnosti koju se želi postići. Ako se želi postići mjerna nesigurnost utega klase E2 tada je potrebno 6 ciklusa ABBA metode, ako se želi postići mjerna nesigurnost F1 ili F2 klase tada je potrebno 3 ciklusa

ABBA metode dok je za mjernu nesigurnost M1 klase utega potreban jedan ciklus ABBA metode.

Opis jednog ciklusa:

1. Nuliranje vage → postupak kojim se vaga stavlja na nulu, nekad može biti recimo na 0,001 kg, a kada se stisne tipka za nuliranje na vagi tada se to pretvara u 0,000 kg.
2. Pričekati 10 sekundi i pojavljivanja znaka za stabilizaciju na monitoru vage
3. Staviti etalonski uteg na vagu = A
4. Pričekati 10 sekundi i pojavljivanje znaka stabilizacije na monitoru vage
5. Tarirati etalonski uteg → njegovu vrijednost prikazati kao novu nulu, odnosno novo početno stanje kako bi kada se stavi ispitni uteg mogli očitati razliku između masa etalona i ispitnog utega
6. Upisati vrijednost mase koja, ako smo dobro radili, uvijek treba iznositi nula.
7. Skinuti etalonski uteg sa vage
8. Pričekati 10 sekundi i pojavljivanje znaka za stabilizaciju na monitoru vage
9. Staviti ispitni uteg na vagu = B
10. Pričekati 10 sekundi i pojavljivanje znaka za stabilizaciju na monitoru vage
11. Upisati vrijednost mase koja će zapravo biti prikaz razlike mase između prvog stavljanja etalona i prvog stavljanja ispitnog utega
12. Skinuti ispitni uteg sa vage
13. Pričekati 10 sekundi i pojavljivanje znaka za stabilizaciju na monitoru vage
14. Ponovno staviti ispitni uteg na vagu = B
15. Pričekati 10 sekundi i pojavljivanje znaka za stabilizaciju na monitoru vage
16. Upisati vrijednost mase sa monitora vage koja će zapravo predstavljati razliku mase između prvog stavljanja etalona i drugog stavljanja ispitnog utega
17. Skinuti ispitni uteg sa vage
18. Pričekati 10 sekundi i pojavljivanje znaka za stabilizaciju na monitoru vage
19. Staviti ponovno etalonski uteg na vagu = A
20. Pričekati 10 sekundi i pojavljivanje znaka za stabilizaciju na monitoru vage

21. Upisati vrijednost mase sa monitora vage koja će zapravo predstavljati razliku mase između prvog stavljanja etalona i drugog stavljanja etalona. Ako je mjerenje precizno, u većini slučajeva ova vrijednost bude 0.

22. Skinuti etalonski uteg sa vage

Nakon završenog prvog ABBA ciklusa, započeti svaki novi ciklus od točke 2, s time da točku 5 treba preskočiti jer se tariranje etalonskog utega vrši samo u prvom ciklusu.

4.5. Određivanje mjerne nesigurnosti

Kada se završi sa ABBA ciklusom uspoređivanja masa etalona sa masom ispitnog nestandardnog utega tada se kreće na određivanje mjerne nesigurnosti. Ova točka bit će detaljno opisana u idućem poglavlju rada jer je ovo zapravo najbitniji dio svakog postupka umjeravanja.

4.6. Označavanje utega

Nakon provedenog umjeravanja na kutiju garniture utega ili samo jednog utega se stavlja naljepnica UMJERENO. Na naljepnicu se upisuje broj umjernice, potpis i datum umjeravanja.

5. PROCJENA MJERNE NESIGURNOSTI UMJERAVANJA NESTANDARDNOG UTEGA

Sva mjerenja mase ili neke druge fizikalne veličine su nesavršena i upravo zbog toga mjerni rezultati uvijek malo odstupaju od prave vrijednosti mjerene veličine. Mjerna nesigurnost prikazuje parametar koji se pridružuje mjernom rezultatu u svrhu određivanja pouzdanosti rezultata mjerenja. Mjerna nesigurnost zapravo daje područje unutar kojeg bi se trebala nalaziti prava vrijednost mjerene veličine. Svrha cijelog postupka umjeravanja je određivanje mjerne nesigurnosti. Određivanje mjerne nesigurnosti vrlo je kompleksno za izvršiti. Da bi se mjerna nesigurnost mogla procijeniti na pravi način, potrebno je utvrditi sve izvore nesigurnosti u mjerenju. Što se više izvora nesigurnosti utvrdi, to će biti točnije izračunata mjerna nesigurnost. U praksi postoji niz mogućih izvora nesigurnosti mjerenja mase, a najvažniji su:

1. pokazivanje vage

Vaga mora imati svojstvo ponovljivosti pokazivanja mjernog rezultata. Sam mjerni proces može biti izvor mjerne nesigurnosti jer se uvijek može dogoditi niz nekakvih sitnih pogriješaka koje su prouzrokovane neiskustvom mjeritelja ili zbog pogriješke u samom postupku mjerenja te upravo ponovljivost vage prikazuje mjernu nesigurnost mjernog procesa. Uz to, vaga ne smije biti osjetljiva na ekscentrično opterećenje, odnosno mjerni rezultati ne smiju odstupati ako se uteg na vagi nalazi malo izvan centra vage. Uz sve navedeno, podjeljak vage također utječe na ukupnu mjernu nesigurnost ispitnog utega.

2. utjecaj uzgona

Jedan dio ukupne mjerne nesigurnosti vaganja nastaje zbog utjecaja uzgona na ispitni i referentni odnosno etalonski uteg. Kod nestandardnih utega će utjecaj uzgona imati posebnu važnost jer su utezi nestandardnih oblika i na svaki će drugačije utjecati uzgon na ukupnu mjernu nesigurnost.

3. utjecaj etalona

Etalonski utezi također mogu biti izvor mjerne nesigurnosti jer su i oni jednom bili umjeravani i u sebi sadrže mjernu nesigurnost koja utječe na točnost mjerenja nestandardnog ispitnog utega. Na mjernu nesigurnost posebno još utječe drift etalona. Drift etalona zapravo predstavlja slabljenje mjeriteljskih značajki etalona. Drift etalona se može uočiti nakon par

umjeravanja etalona jer se nakon par umjeravanja može zaključiti da li se mjerni rezultati mijenjaju slabo ili jako, odnosno da li nastaje slabi ili jaki drift etalona koji utječe na ukupnu mjernu nesigurnost ispitnog nestandardnog utega.

4. Elektromagnetske osobine ispitnog utega

Elektromagnetske osobine ispitnog utega moraju se ispitati ako se želi procijeniti mjerna nesigurnost ispitnog utega koja odgovara razredu točnost standardnih utega razreda točnosti veće od M1. Ukoliko susceptibilnost ispitnog utega ne ispunjava zahtjeve koji vrijede za standardne utege, umjeravanje se obustavlja i ne može se provesti na elektroničkim vagama.

5. Okolišni uvjeti

Temperatura utega može se razlikovati od temperature vage zbog čega može doći do stvaranja konvenkcijske sile koja može utjecati na rezultat vaganja. Provodi se temperaturna stabilizacija utega prema tablici 8. čime doprinos nesigurnosti radi razlike u temperaturi etalona i ispitnog utega, postaje zanemariv.

5.1. Masa, gustoća i volumen ispitnog nestandardnog utega

Prije proračuna mjerne nesigurnosti ispitnog nestandardnog utega dobro je znati na koji način se dolazi do mase, gustoće i volumena ispitnog utega. Za sam proračun mjerne nesigurnosti bit će posebno važno znati odrediti gustoću ispitnog utega. Masa ispitnog utega se određuje prema jednadžbi 5.1 koja je zapravo trivijalna i prikazuje jednakost zbroja masenih i uzgonskih sila ispitnog i etalonskog utega.

$$m_t = m_r + (V_t - V_r) * \rho_a \quad \text{Jednadžba 5.1}$$

gdje je:

m_t – masa ispitnog utega

m_r – masa etalona, za naš slučaj razreda točnosti F1

V_t – obujam ispitnog utega

V_r – obujam standardnog utega

ρ_a – gustoća zraka (obično 1,2 kg/m³)

Kako bi izračunali masu ispitnog utega potrebno je izračunati i gustoću ispitnog utega koja se može izračunati ili iskustveno uzeti iz tablica u zavisnosti o materijalu ispitnog utega koji se umjerava. Ako se računa, onda se izračunava prema sljedećem izrazu:

$$\rho_t = \frac{W_1 * \rho_w - W_2 * \rho_a}{W_1 - W_2} \quad \text{Jednadžba 5.2}$$

gdje je:

ρ_t – gustoća ispitnog utega,

ρ_w – gustoća vode na sobnoj temperaturi,

ρ_a – gustoća zraka (1,2 kg/m³),

W_1 – izvagana vrijednost ispitnog utega u zraku,

W_2 – izvagana vrijednost ispitnog utega u vodi.

Kako bi se gustoća ispitnog nestandardnog utega odredila prema ovoj formuli potrebno je provesti hidrostatsko vaganje, odnosno vaganje mase ispitnog utega u vodi. Zbog toga što je ovaj postupak komplicirano provoditi za svaki uteg, kako bih si olakšao postupak mjerenja, određivao sam gustoću prema tabličnim vrijednostima za određeni materijal iz kojeg su izrađeni nestandardni utezi. Moje garniture utega su izrađene od nehrđajućeg čelika i procijenio sam tj. na jednoj garnituri mi je čak navedeno da su utezi gustoće $\rho_t=8000 \text{ kg/m}^3$. Ovaj postupak se nužno mora provoditi za one nestandardne utege koji nisu napravljeni iz jednog materijala već iz dva ili više kako bi se odredila prosječna gustoća tijela. Preko gustoće i mase ispitnog utega se vrlo lako dolazi i do volumena ispitnog utega iz svima poznatog izraza:

$$V_t = \frac{m_t}{\rho_t} \quad \text{Jednadžba 5.3}$$

Ako pak ne želimo prvo računati gustoću ispitnog utega, možemo odmah računati volumen ispitnog utega koji se izračunava nakon mjerenja njegovih dimenzija uporabom poznatih matematičkih izraza za taj oblik tijela. Mjerna nesigurnost tako izračunatog obujma ovisi o mjernoj nesigurnosti mjerača duljine, stoga ovaj postupak također malo komplicira određivanje mjerne nesigurnosti jer postoji dodatan član koji utječe na ukupnu mjernu nesigurnost mjernog rezultata. Ako je pak oblik ispitnog utega takav da je obujam teško izračunati mjerenjem njegovih dimenzija, obično se on određuje uranjanjem ispitnog tijela u tekućinu i očitanjem promjene visine tekućine. Masa, gustoća i volumen ispitnog tijela se određuju kako bi se prikazao utjecaj uzgona na ukupnu mjernu nesigurnost. Najbitnije je odrediti gustoću ispitnog utega i obično se to radi na način da se uzima iskustvena vrijednost iz tablica za određeni materijal.

5.2. Procjena mjerne nesigurnosti

Postoje dva načina procjene mjerne nesigurnosti, a to su procjena mjerne nesigurnosti tipa A i procjena mjerne nesigurnosti tipa B. Procjena mjerne nesigurnosti tipa A određuje se statističkom analizom niza opažanja. U ovom slučaju standardna nesigurnost je eksperimentalno standardno odstupanje srednje vrijednosti koje se dobiva uprosječenjem ili odgovarajućom analizom. Procjena mjerne nesigurnosti tipa B određuje se na način koji se razlikuje od statističke analize niza opažanja. Procjena mjerne nesigurnosti tipa B zasniva se na znanstvenoj prosudbi svih raspoloživih podataka koji mogu biti:

- prethodni mjerni podaci
- proizvođačevi tehnički podaci
- podaci s umjernica i ovjernica
- podaci iz priručnika

Nakon što se odrede mjerne nesigurnosti tipa A i tipa B ide se na određivanje složene ili sastavljene mjerne nesigurnosti. Sastavljena mjerna nesigurnost se množi sa faktorom pokrivanja koji utječe na pouzdanost rezultata kako bi se dobila proširena standardna nesigurnost. Što je veći faktor pokrivanja to će biti veća proširena standardna nesigurnost, odnosno bit će veće područje unutar kojeg bi se trebala nalaziti prava vrijednost mjerene veličine.

5.2.1. Procjena mjerne nesigurnosti tipa A

Mjerna nesigurnost tipa A dobije se iz standardnog odstupanja razlike masa ispitnog nestandardnog utega i standardnog etalonskog utega n puta ponovljenih mjerenja prema sljedećem izrazu:

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad \text{Jednadžba 5.4}$$

gdje je:

u_A – mjerna nesigurnost ponovljenih mjerenja

n – broj ciklusa ponavljanja vaganja

s – standardna devijacija tj. standardno odstupanje rezultata ponovljenih vaganja

Standardna devijacija je statistički pojam koji označava mjeru raspršenosti podataka u skupu.

Interpretira se kao prosječno odstupanje od prosjeka i to u apsolutnom iznosu. Računa se prema jednadžbama 4.1 i 4.2 iz prethodnog poglavlja, stoga ovom mjernom nesigurnošću se izračunava ponovljivost vaganja. Ponovljivost je mjera slučajne varijabilnosti očitavanja vrijednosti vaganja i to je jedini doprinos tipa A u procjeni mjerne nesigurnosti.

5.2.2. Procjena mjerne nesigurnosti tipa B

Kao što sam rekao mjerna nesigurnost tipa B određuje se iz nekih prijašnjih mjerenja, umjernica, ovjernica ili kataloga i prema toj metodi se procjenjuje mjerna nesigurnost:

1. podjeljka vage
2. etalona
3. drifta etalona
4. zbog utjecaja uzgona
5. ekscentričnosti vage

Procjena mjerne nesigurnosti tipa B može biti prema normalnoj razdiobi kao i kod mjerne nesigurnosti tipa A, a može biti i prema pravokutnoj, trokutastoj ili nekoj drugoj razdiobi.

5.2.2.1. Mjerna nesigurnost podjeljka vage

Standardna nesigurnost rezultata vaganja uslijed podjeljka digitalne vage d računa se prema sljedećem izrazu:

$$u_d = \frac{(d/2)}{\sqrt{3}} * \sqrt{2} \quad \text{Jednadžba 5.5}$$

Procjena standardne nesigurnosti tipa B može biti također normalna kao kod tipa A, ali može biti i pravokutna, trokutasta ili sl. Procjenjuje se da mjerna nesigurnost podjeljka vage ima pravokutnu raspodjelu unutar granica $\pm d$ i zbog toga se u formuli pojavljuje $\sqrt{3}$. Faktor $\sqrt{2}$ dolazi od dva očitavanja, jedno od ispitnog utega a drugo od etalonskog utega.

5.2.2.2. Mjerna nesigurnost etalona

Standardna mjerna nesigurnost etalona $u_c(m_{cr})$ može se izračunati iz proširene mjerne nesigurnosti dane u potvrdi o umjeravanju dijeljenjem s faktorom pokrivanja k (obično $k = 2$).

$$u_c(m_{cr}) = \frac{U}{k} \quad \text{Jednadžba 5.6}$$

kad se primjenjuje zajedno više etalonskih utega kako bi se dobila tražena vrijednost mase, ukupna standardna mjerna nesigurnost etalona jednaka je sumi pojedinačnih mjernih nesigurnosti.

5.2.2.3. Mjerna nesigurnost drifta etalona

Mjerna nesigurnost etalona mora se proširiti procijenjenom nesigurnošću uslijed nestabilnosti mase $u_s(m_{cr})$ tzv. drift utega. Mjerna nesigurnost zbog nestabilnosti etalonskog utega $u_s(m_{cr})$ može se procijeniti praćenjem promjene vrijednosti mase nakon nekoliko uzastopnih umjeravanja. Iz dosadašnjeg praćenja, promjena vrijednosti mase etalona nikad nije bila veća od 1/3 kombinirane mjerne nesigurnosti etalona:

$$u_s(m_{cr}) = \frac{u_c(m_{cr})}{3} \quad \text{Jednadžba 5.7}$$

Mjerna nesigurnost uzrokovana zbog drifta može imati veliki utjecaja na ukupnu kombiniranu mjernu nesigurnost ispitnog nestandardnog utega.

5.2.2.4. Mjerna nesigurnost zbog utjecaja uzgona

Mjerna nesigurnost uzrokovana uzgonom računa se prema slijedećem izrazu:

$$u_b^2 = \left[m_{cr} * \frac{(\rho_{ref} - \rho_t)}{\rho_{ref} * \rho_t} * u(\rho_a) \right]^2 + [m_{cr} * (\rho_a - \rho_o)]^2 * \frac{u^2(\rho_t)}{\rho_t^4} + m_{cr}^2 * (\rho_a - \rho_o) * [(\rho_a - \rho_o) - 2 * (\rho_{a1} - \rho_o)] * \frac{u^2(\rho_{ref})}{\rho_r^4} \quad \text{Jednadžba 5.8}$$

gdje je:

$u(\rho_t)$ - mjerna nesigurnost gustoće ispitnog utega

$u(\rho_{ref})$ - mjerna nesigurnost gustoće referentnog utega

$u(\rho_a)$ - mjerna nesigurnost gustoće zraka

ρ_{a1} - gustoća zraka tijekom prijašnjeg umjeravanja referentnog utega

ρ_a - gustoća zraka

ρ_{ref} - gustoća referentnog utega

ρ_t - gustoća ispitnog utega

ρ_o - gustoća zraka kao referentna vrijednost 1,2 kg/m³

m_{cr} - konvencionalna masa referentnog utega

Mjerna nesigurnost gustoće zraka $u(\rho_a)$ zraka računa se prema sljedećoj formuli:

$$u(\rho_a) = \sqrt{u_F^2 + \left(\frac{\partial \rho_a}{\partial p} * u_p\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_a}{\partial t} * u_t\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_a}{\partial hr} * u_{hr}\right)^2} \quad \text{Jednadžba 5.9}$$

gdje je:

$$u_F = 10^{-4} * \rho_a$$

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial p} = 10^{-5} * \rho_a$$

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} = -3,4 * 10^{-3} * \rho_a$$

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial hr} = -10^{-2} * \rho_a$$

Gustoća zraka ρ_a računa se prema sljedećoj formuli:

$$\rho_a = \frac{0,34848 * p_a - 0,009024 * \varphi_a^{0,0612 * \vartheta_a}}{273,15 + \vartheta_a} \quad \text{Jednadžba 5.10}$$

gdje je:

p_a – tlak zraka u laboratoriju [hPa]

φ_a – relativna vlažnost zraka [%]

ϑ_a – temperatura zraka u laboratoriju [°C]

Vrijednosti u_p , u_t i u_{hr} vade se iz starih umjernica od datalogera.

5.2.2.5. Mjerna nesigurnost zbog ekscentričnosti vage

Mjerna nesigurnost zbog ekscentričnosti vage se računa prema sljedećem izrazu:

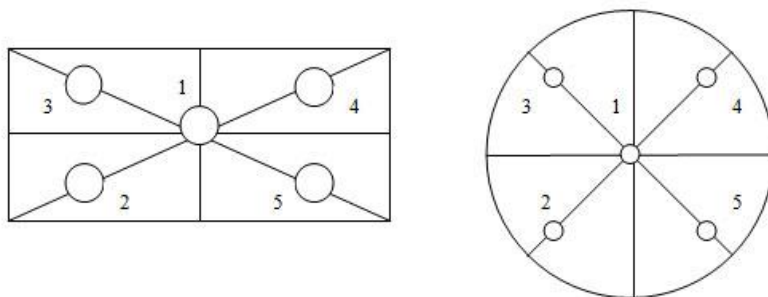
$$u_{EKS} = \frac{\max - \min}{\sqrt{12}} \quad \text{Jednadžba 5.11}$$

gdje je:

\max – maksimalna izvagana vrijednost ispitnog utega

\min – minimalna izvagana vrijednost ispitnog utega

Mjerna nesigurnost zbog ekscentričnosti vage računa se na način da se uteg postavlja na pet različitih pozicija na vagi prema slici 8. te se na taj način ispituje osjetljivost vage na ekscentrično postavljanje utega zbog nemogućnosti dobrog pozicioniranja utega na vagu.



Slika 8. Ispitivanje ekscentričnosti vage

Nakon svakog postavljanja utega izmjeri se masa i zapiše. Minimalna i maksimalna vrijednost svih pet mjerenja koristi se za izračunavanje ekscentričnosti vage. Ekscentrično postavljanje utega na vagu neće imati veliki utjecaj kod mojih garnitura jer zbog svoje veličine i središnje rupe mogao sam jako dobro centrirati utege na vagu, stoga sam u proračunu izostavio ovaj član u ukupnoj kombiniranoj mjernoj nesigurnosti.

5.2.3. *Kombinirana mjerna nesigurnost postupka umjeravanja*

Kombinirana mjerna nesigurnost $u_c(m_t)$ postupka umjeravanja definirana je prema osnovnom izrazu:

$$u_c(m_t) = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad \text{Jednadžba 5.12}$$

Kombinirana mjerna nesigurnost uključuje i mjernu nesigurnost tipa A i mjernu nesigurnost tipa B. Općenitiji zapis jednadžbe 5.10 je:

$$u_c(m_t) = \sqrt{\frac{s^2}{n} + u_d^2 + u_c^2(m_{cr}) + u_s^2(m_{cr}) + u_b^2} \quad \text{Jednadžba 5.13}$$

5.2.4. *Proširena mjerna nesigurnost postupka umjeravanja*

Proširena mjerna nesigurnost se određuje kako bi se povećala pouzdanost naše ukupne mjerne nesigurnosti te se određuje prema sljedećem izrazu:

$$U = k * u_c(m_t) \quad \text{Jednadžba 5.14}$$

gdje je:

k – faktor pokrivanja

$u_c(m_t)$ – kombinirana mjerna nesigurnost ispitnog utega

Preko faktora pokrivanja može se odrediti kolika je pouzdanost izračunate proširene mjerne nesigurnosti što se može vidjeti na sljedećoj tablici:

Tablica 10. Prikaz pouzdanosti u ovisnosti o faktoru pokrivanja

Razina pouzdanosti P [%]	Faktor pokrivanja k
68,27	1
95,45	2
99,73	3

5.2.5. Prikazivanje rezultata umjeravanja

Rezultat umjeravanja daje se za konvencionalnu masu ispitnog utega u obliku:

$$m_{ct} = m_o + \Delta\bar{m}_c \pm U \quad \text{Jednadžba 5.15}$$

gdje je:

m_o - masa etalona (iz potvrde o umjeravanju)

$\Delta\bar{m}_c$ - srednja vrijednost razlike masa ispitnog i etalonskog utega, jednadžba 4.1

U – proširena mjerna nesigurnost (obično s faktorom pokrivanja $k = 2$)

6. PRIKAZ PRORAČUNA I REZULTATA UMJERAVANJA DVIJU GARNITURA NESTANDARDNIH UTEGA TLAČNIH VAGA

Glavni zadatak ovog završnog rada bio je umjeriti i proračunati mjernu nesigurnost svih utega iz dvije garniture nestandardnih utega koji se koriste za mjerenje tlaka kod tlačnih vaga. Garniture utega mogu se vidjeti na sljedećim slikama:



Slika 9. Garnitura utega br. 1



Slika 10. Garnitura utega br. 2

Proračun umjeravanja prikazat ću samo na jednom utegu i takav proračun vrijedit će za sve iduće utege. Na kraju ću rezultate svih dobivenih mjernih nesigurnosti svih utega prikazati u

tablicama i usporediti sa mjernim nesigurnostima iz starih umjernica koje sam dobio od mentorice prof. dr. sc. Lovorke Grgec Bermanec, dipl. ing.

6.1. Proračun mjerne nesigurnosti na jednom utegu

Izabrao sam uteg iz prve garniture utega. Uzeo sam mali prsten od mesinga. Prije proračuna izvršava se metoda ABBA.

Laboratorij za masu		PROTOKOL ZA UMJERAVANJE UTEGA BR. _____	
Vlasnik: _____			
1. Podaci o utegu			
Nazivna vrijednost	23,3 g		
Razred točnosti	-		
Oznaka	MES. PRSTEN		
Tv./Ser. broj	-		
2. Podaci o etalonu			
Nazivna vrijednost	(20+5) g		
Razred točnosti	F1		
Oznaka	-		
Broj garniture utega	GRT 12		
3. Podaci o vagi			
Tip vage	HP 320 DC		
4. Uvjeti okoliša			
Temperatura (°C)	21		
Tlak (mbar)	1018		
Relativna vlaga (%)	48		
MJERITELJSKI PREGLED			
(A) Etalon	0,00		
(B) Uteg	-1,66826		
(B) Uteg	-1,66838		
(A) Etalon	-0,00006		
(A) Etalon	-0,00004		
(B) Uteg	-1,66833		
(B) Uteg	-1,66835		
(A) Etalon	-0,00005		
(A) Etalon	-0,00004		
(B) Uteg	-1,66829		
(B) Uteg	-1,66832		
(A) Etalon	-0,00004		

Slika 11. Prikaz rezultata dobivenih ABBA metodom

Nakon toga ide se na određivanje mjerne nesigurnosti ponovljivosti vage prema formulama 4.1, 4.2 i 5.4. Prema tim formulama dobije se:

$$\Delta \bar{m}_c = -1,668283 \text{ g}$$

$$s = 2,58 \cdot 10^{-2} \text{ mg}$$

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{2,58 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{3}} = 0,014895 \text{ mg}$$

Nakon određivanja mjerne nesigurnosti zbog ponovljivosti ide se na određivanje mjernih nesigurnosti tipa B.

Mjerna nesigurnost podjeljka vage

Mjerna nesigurnost podjeljka vage računa se prema jednadžbi 5.5 gdje d predstavlja podjeljak vage koji za vagu HP 220 DC iznosi $d = 0,01$ mg. Prema tome, mjerna nesigurnost podjeljka vage iznositi će:

$$u_d = \frac{(d/2)}{\sqrt{3}} * \sqrt{2} = \frac{0,005}{\sqrt{3}} * \sqrt{2} = 4,0824 * 10^{-3} \text{ mg}$$

Mjerna nesigurnost etalona

Mjerna nesigurnost etalona određuje se prema jednadžbi 5.6 gdje je faktor pokrivanja $k = 2$ i proširena mjerna nesigurnost $U = U_{20g} + U_{5g} = 0,13$ mg. Proširena mjerna nesigurnost dobije se zbrajanjem mjernih nesigurnosti za etalon od 20 g i 5 g pomoću kojih se umjerava prsten od mesinga. Podatke o proširenim mjernim nesigurnostima se dobije iz starih umjernica. Prema tome, mjerna nesigurnost etalona iznosi:

$$u(m_{cr}) = \frac{U}{k} = \frac{0,13}{2} = 0,065 \text{ mg}$$

Mjerna nesigurnost drifta etalona

Mjerna nesigurnost drifta etalona računa se prema jednadžbi 5.7:

$$u_s(m_{cr}) = \frac{u_c(m_{cr})}{3} = \frac{0,065}{3} = 0,0216 \text{ mg}$$

Mjerna nesigurnost zbog utjecaja uzgona

Mjerna nesigurnost zbog utjecaja uzgona računa se prema jednadžbama 5.8, 5.9 i 5.10. Kako bi se riješile te jednadžbe potrebno je očitati temperaturu, tlak i relativnu vlažnost zraka u laboratoriju.

$$p_a = 1018 \text{ hPa}$$

$$\varphi_a = 48 \%$$

$$\vartheta_a = 21 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Iz ta tri podatka prema jednadžbi 5.10 sljedi da je:

$$\rho_a = 1,201 \text{ kg/m}^3$$

Kada se odredi gustoća zraka u prostoriji vrlo lako se može odrediti i mjerna nesigurnost gustoće zraka koja se određuje prema izrazu 5.9. Za izračun mjerne nesigurnosti gustoće

zraka potrebno je odrediti vrijednosti u_p , u_t i u_{hr} koje se pronalaze u starim umjernicama od datalogera.

$$u_p = 50 \text{ Pa}$$

$$u_t = 0,075 \text{ K}$$

$$u_{hr} = 0,35 \% \text{ rv (relativne vlažnosti)}$$

Iz svih navedenih podataka dolazi se do mjerne nesigurnosti gustoće zraka koja prema jednadžbi 5.9 iznosi:

$$u(\rho_a) = 4,26 * 10^{-3} \text{ kg/m}^3$$

Nakon određivanja mjerne nesigurnosti gustoće zraka određuje se mjerna nesigurnost zbog utjecaja uzgona. Kako bi prema formuli 5.9 odredio mjernu nesigurnost zbog utjecaja uzgona trebam izvaditi podatke iz starih umjernica, ovjernika, kataloga o mjernoj nesigurnosti gustoće ispitnog utega $u(\rho_t)$, mjernoj nesigurnosti gustoće referentnog utega $u(\rho_{ref})$, gustoći zraka tijekom (prijašnjeg) umjeravanja referentnog utega ρ_{a1} , gustoći referentnog utega ρ_{ref} , gustoći ispitnog utega ρ_t i konvencionalnoj masi referentnog utega m_{cr} .

$$u(\rho_t) = 170 \text{ kg/m}^3$$

$$u(\rho_{ref}) = 70 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{a1} = 1,201 \text{ kg/m}^3 - \text{obično bude ista ili približno ista kao i sadašnja gustoća zraka jer}$$

se stanje zraka u laboratoriju održava konstantno tokom cijele godine

$$\rho_{ref} = 7950 \text{ kg/m}^3 - \text{uzima se gustoća iz kataloga za nehrđajući čelik}$$

$$\rho_t = 8400 \text{ kg/m}^3 - \text{uzima se gustoća iz kataloga za mesing}$$

NAPOMENA: pretpostavio sam da je gustoća ostalih utega u garnituri br. 1 od nehrđajućeg čelika, dok mi za garnituru br. 2 u starim umjernicama piše da uzimam gustoću od 8000 kg/m³

$$m_{cr} = m_{cr20g} + m_{cr5g} = 24,9999 \text{ g.}$$

Sada kada smo izvadili ove podatke iz umjernica ili kataloga vrlo lako se uvrštavanjem tih vrijednosti u jednadžbu 5.9 može odrediti mjerna nesigurnost zbog utjecaja uzgona koja za ovaj uteg iznosi:

$$u_b = 5,16 * 10^{-19} \text{ mg}$$

Kao što se može vidjeti utjecaj mjerne nesigurnosti uzgona na ukupnu mjernu nesigurnost je jako mali i rijetko kada više utječe na ukupnu mjernu nesigurnost.

Kada smo odredili sve mjerne nesigurnosti tipa B idemo na određivanje kombinirane mjerne nesigurnosti $u_c(m_t)$ koja se određuje prema jednadžbi 5.12 odnosno 5.13.

$$\begin{aligned} u_c(m_t) &= \sqrt{\frac{s^2}{n} + u_d^2 + u^2(m_{cr}) + u_s^2(m_{cr}) + u_b^2} \\ &= \sqrt{0,014895^2 + (4,0824 * 10^{-3})^2 + 0,065^2 + 0,0216^2 + (5,16 * 10^{-19})^2} \\ &= 0,07 \text{ mg} \end{aligned}$$

Nakon određivanja kombinirane mjerne nesigurnosti određuje se proširena mjerna nesigurnost prema jednadžbi 5.14 gdje faktor pokrivanja k iznosi 2.

$$U = k * u_c(m_t) = 2 * 0,07 = 0,14 \text{ mg}$$

6.2. Rezultati umjeravanja dviju garnitura nestandardnih utega

Rezultati umjeravanja prikazani su u tablicama 11. i 12. U tablicama sam naveo rezultate prijašnjeg umjeravanja garnitura zajedno sa novim umjeravanjem koje sam izvršio za potrebe ovog rada. Uz to, za svaki uteg prikazao sam i faktor slaganja E_n . Faktor slaganja E_n računa se u svrhu ocjene kompatibilnosti rezultata mjerenja laboratorija koji sudjeluje u usporedbenom mjerenju prema referentnom rezultatu. Referentni rezultati za moja mjerenja bit će stare umjernice. Faktor slaganja E_n računa se prema sljedećem izrazu:

$$E_n = \frac{X_{lab} - X_{ref}}{\sqrt{u_{lab}^2 + u_{ref}^2}} \quad \text{Jednadžba 6.1}$$

Faktor slaganja mora biti unutar intervala $\langle 1, -1 \rangle$. Što je vrijednost E_n bliža nuli, to je kompatibilnost tog rezultata bolja. Ako vrijednost odstupa izvan navedenog intervala, tada rezultati mjerenja nisu kompatibilni. Uzrok tome može biti velika oštećenja utega tokom dugogodišnjeg rada ili nepravilno izvođenje umjeravanja. U tablicama 11. i 12. sa crvenom bojom označio sam kućice sa faktorima slaganja koji odstupaju od intervala $\langle 1, -1 \rangle$. U tablici 11. vidi se da kod prve garniture, šest utega ima faktor slaganja koji odstupa od navedenog intervala. Uzrok tome je sigurno starost i visoka oštećenost tih utega, a ne postupak umjeravanja jer se u tablici 12. vidi da sva mjerenja na utezima garniture br. 2 imaju faktor pokrivanja koji se nalazi unutar intervala $\langle 1, -1 \rangle$ i zbog toga sam postupak umjeravanja sigurno nije uzrok lošim rezultatima za prvu garnituru utega već je uzrok tome visoka istrošenost nestandardnih utega iz te garniture.

Tablica 11. Rezultati umjeravanja garniture utega br. 1

GARNITURA br. 1		Staro umjeravanje - izvedeno u DZNM - laboratorij za masu 2000. god.		Novo umjeravanje - izvedeno u Vage d.o.o. - laboratorij za masu		
Nazivna vrijednost	Oznaka	Dogovorena masa [kg]	Mjerna nesigurnost [mg]	Dogovorena masa [kg]	Mjerna nesigurnost [mg]	Faktor slaganja E_n
543 g	O.U. (A)	0,543789	0,75	0,54376187	1,949	-12,99
23 g	Mes. Prsten (C)	0,02333278	0,08	0,023331707	0,14	-6,65
24 g	klipić (B)	0,0245841	0,08	0,02457705	0,161	-39,21
255 g	D.U.O.	0,255365	0,3	0,25536537	2,982	0,12
8224 g	1	8,22473	15	8,22474175	45,133	0,25
8224 g	2	8,22478	15	8,22476175	45,133	-0,38
8224 g	3	8,22479	15	8,22482175	20,904	1,23
8224 g	4	8,22477	15	8,22479175	20,904	0,85
7402 g	5	7,40239	15	7,4023798	43,199	-0,22
4112 g	6	4,112335	7,5	4,11233368	30,16	-0,04
1644 g	7	1,64499	3	1,64498778	8,449	-0,25
1644 g	8	1,644879	3	1,64487278	16,474	-0,37
822 g	9	0,822427	1,5	0,8224242	2,159	-1,07
822 g	9 - 0,0625			0,82246864	3,288	
411 g	10	0,411225	0,75	0,41122943	1,073	3,38
411 g	11			0,41126493	6,5	
205 g	13			0,20560564	2,967	

Tablica 12. Rezultati umjeravanja garniture utega br. 2

GARNITURA br. 2		Staro umjeravanje - izvedeno u DH instruments (DHI) - 2009. god.		Novo umjeravanje - izvedeno u Vage d.o.o. - laboratorij za masu		
Nazivna vrijednost	Oznaka	Dogovorena masa [kg]	Mjerna nesigurnost [mg]	Dogovorena masa [kg]	Mjerna nesigurnost [mg]	Faktor slaganja En
100 g	0,1 kg - 1	0,1000011	0,4	0,10000105	0,297	-0,10
200 g	0,2 kg - 1	0,1999982	0,6	0,19999875	0,337	0,80
200 g	0,2 kg - 2	0,2000016	0,6	0,200001367	1,287	-0,16
300 g	0,3 kg -1			0,299970517	2,079	
500 g	0,5 kg - 1	0,5000031	1,5	0,5000048	1,978	0,68
1 kg	1 kg - 1	1,000013	2,5	1,000014267	1,751	0,42
2 kg	2 kg - 1	2,000026	4,6	2,000025533	9,944	-0,04
2 kg	2 kg - 2	2,000026	5,8	2,0000322	13,038	0,43
4,5 kg	4,5 kg - 1	4,500024	6,7	4,5000383	17,834	0,75
5 kg	5 kg - 1	5,000044	9	5,000057367	19,664	0,62
5 kg	5 kg - 2	5,000062	7,7	5,0000707	11,738	0,62
5 kg	5 kg - 3	5,000011	7,2	5,000019033	12,649	0,55
5 kg	5 kg - 4	5,000044	8,6	5,0000507	15,635	0,38
5 kg	5 kg - 5	5,000035	8,9	5,0000457	19,777	0,49

7. ZAKLJUČAK

Postupci umjeravanja mase ili bilo koje druge fizikalne veličine su bitni za povećanje i održavanje kvalitete mjerenja. Najbitniji podatak koji se dobije umjeravanjem je mjerna nesigurnost koja predstavlja važnu komponentu mjernog rezultata i njezin proračun je neophodan da bi se odredila adekvatnost mjernog rezultata za određenu upotrebu. Najvažniji čimbenici koji utječu na mjernu nesigurnost kod mjerenja mase su ponovljivost vage, ekscentričnost vage, podjeljak vage, etalon, drift etalon i uzgon. Jedina velika razlika između umjeravanja standardnih i nestandardnih utega može biti u ekscentričnosti vage. Ekscentričnost vage utječe na mjernu nesigurnost samo ako se utezi ne stavljaju točno u središte vage. Nestandardni utezi na kojima sam ja vršio ispitivanja vrlo lako su se mogli pozicionirati točno u središte vage i zbog toga je utjecaj ekscentričnosti vage na mjernu nesigurnost kod njih zanemariv. Naravno, sigurno postoje nestandardni utezi koji se zbog svojeg oblika neće moći lako centrirati na vagu i zbog kojih će se morati računati utjecaj ekscentričnosti vage na mjernu nesigurnost i tada neće biti razlike između umjeravanja nestandardnih utega i standardnih utega. Jako me iznenadilo da oblik nestandardnih utega, odnosno uzgon nestandardnih utega neće imati veliki utjecaj na promjenu ukupne mjerne nesigurnosti u odnosu na standardne utege jer je sama promjena ukupne mjerne nesigurnosti zbog mjerne nesigurnosti uzgona reda veličine od 10^{-15} do 10^{-25} i zanemarivo je mala u odnosu na promjenu ukupne mjerne nesigurnosti zbog drugih čimbenika (ponovljivost vage, ekscentričnost vage, podjeljak vage...). Postupak umjeravanja nestandardnih utega koji sam izradio u ovom radu dao je vrlo dobre, pa čak i izvrsne rezultate mjernih nesigurnosti utega u odnosu na rezultate iz starih umjernica. Prva garnitura utega je imala nešto lošije rezultate od druge garniture utega, a uzrok tome nije sigurno postupak umjeravanja već jako loše i istrošeno stanje tih starih utega. Zaključno mogu reći da su rezultati umjeravanja druge novije garniture utega izvrsni i iz njih se može vidjeti da se na tu garnituru utega jako pazi dok se kod prve starije garniture utega može jako dobro vidjeti pad kvalitete utega i za njih predlažem kraće umjerno razdoblje (razdoblje između dva umjeravanja) kako bi se što bolje kontrolirali mjerni rezultati tih utega.

LITERATURA

- [1] Dr. Clemens Sanetra, Rocio M. Marban: *Nacionalna infrastruktura kakvoće*, PTB – Physikalisch Technische Bundesanstalt, 2000.
- [2] Davidson S., Perkin M., Buckley M.: *The Measurement of Mass and Weight*, NPL – National Physical Laboratory, 2004.
- [3] Međunarodna organizacija za zakonodavno mjeriteljstvo (OIML): *Međunarodni dokument OIML R 111-1*, DZM, 2004.
- [4] Roman Schwartz: *Guide to mass determination with high accuracy*; PTB – Physikalisch Technische Bundesanstalt, 1995.
- [5] Staphanie Bell: *A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement*; Measurement Good Practice Guide, Issue 2, NPL, 2001.
- [6] DZNM: *Izješće o ispitivanju br.: 1/00*, DZNM, 2000.
- [7] DZNM: *Izješće o ispitivanju br.: 9/05*, DZNM, 2005.
- [8] DH Instruments(DHI): *Calibration report no. 65002*, DHI, 2009.
- [9] JCGM - Joint Committee for Guides in Metrology: *Vrednovanje mjernih podataka – Upute za iskazivanje mjerne nesigurnosti*, DZM, 2008.
- [10] EA (European co-operation for Accreditation) Laboratory Committee - *Izražavanje mjerne nesigurnosti pri umjeravanju*, DZM, 2008.
- [11] Prof. Dr. M. Kochsiek: *Fundamentals of Mass Determination*, METTLER - TOLEDO, 1991.